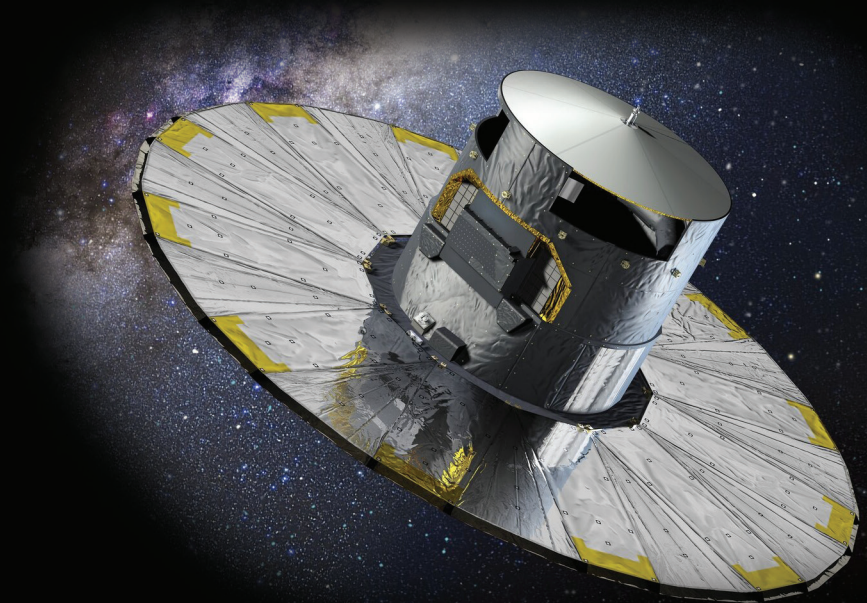


Űrtan Évkönyv 2023

Az Asztronautikai Tájékoztató 75. száma

Kiadja a Magyar Asztronautikai Társaság

Űrtan Évkönyv 2023



Űrtan Évkönyv 2023

Az Asztronautikai Tájékoztató 75. száma

Kiadja a Magyar Asztronautikai Társaság

Űrtan Évkönyv 2023

Az Asztronautikai Tájékoztató 75. száma

Szerkesztette: dr. Frey Sándor

Kiadja: a Magyar Asztronautikai Társaság

1044 Budapest, Ipari park u. 10.

www.mant.hu

Budapest, 2024

Tördelés, grafikai szerkesztés: Horváth Róbert

A szöveget ellenőrizte: Kóra Szilvia és Bakonyiné Harascsák Ildikó

Felelős kiadó: Arnócz István főtktár

Kézirat gyanánt

Borítókép: Az Európai Űrügynökség 2013-ban indított Gaia űrszondája immár több mint egy évtizede végzi pontos méréseit, elsősorban a Tejútrendszer három dimenzióban való feltérképezésére. (Forrás: ESA)

HU ISSN 1788-7771

Előszó

Ha új év, akkor új évkönyv! A Magyar Asztronautikai Társaság (MANT) az előző, 2023-as esztendőre visszatekintő Űrtan Évkönyvében most is érdekes szakmai-ismeretterjesztő cikkeknek adott megjelenési lehetőséget. Köszönjük szerzőink lelkiismeretes munkáját, akik publikációs felhívásunkra válaszul küldték be írásaikat. Olvasóink legnagyobb öröme a témák ebben az évben is meglehetősen változatosak. Tájékozódhatunk a kozmikus sugárzásról és intenzitásának a Nap aktivitásával való összefüggéséről, bepillantást nyerhetünk központi csillagunk üresközökkel végzett kutatásaiba, valamint ízelítőt kapunk érdekes bolygókutatási műszertechnikai megoldásokból. Műholdképek segítségével ellátogatunk egy marokkói marsi analóg területre, majd egy nagy ugrással távoli csillagobbanásoknak, a szupernóváknak és maradványaiknak a James Webb-űrtávcsővel készült lélegzetelállító felvételeivel ismerkedhetünk meg. Végül a 2023-ban épp tíz éve működő, a csillagászat számos területét forradalmasító, nagy sikerű európai Gaia űrtávcső tudományos eredményeiből idézünk fel néhányat, magyar vonatkozásokkal.

Szerkesztőként külön öröm látni, hogy cikkeink szerzői között szép számmal találhatók egyetemi vagy doktori tanulmányaikat végző fiatal szakemberek. Lassan már két évtizede, az Asztronautikai Tájékoztató kiadványának megújításakor határozta el a MANT, hogy külön is felhívja a doktori tanulmányaikat végző fiatalok figyelmét erre a publikációs formára. Nekik különösen fontos – az olvasók számára pedig különösen érdekes –, hogy kutatási témájukról magyar nyelven, közérthető módon tájékoztassák az érdeklődőket.

Az Űrtan Évkönyvet hagyományosan a MANT legfontosabb rendezvényeit, eseményeit felidéző összefoglaló zárja. Mint minden évben, most is dokumentálni szeretnénk, hogy a lassan hét évtizeddel ezelőtt alapított egyesületünk – nagylelkű támogatói, szakmai partnerei, és nem utolsósorban lelkes tagsága segítségével – 2023-ban is aktívan dolgozott a szerteágazó ürtevékenység megismertetése és a népszerűsítése érdekében.

Bízom benne, hogy mindenki talál az érdeklődésének megfelelő témákat a 2023-as Űrtan Évkönyvben, sőt a legtovább az elejétől a végéig elolvassák összes írásunkat!

Budapest, 2024. május

A szerkesztő

A kozmikus sugárzás és a napaktivitás kapcsolata

Kisvárdai Imre¹,
Forgács-Dajka Emese^{1,2},
Gálik Barbara¹,
Pádár Noémi¹,
Bebesi Zsófia³

Földünk légkörét nemcsak porszemcsék, esetenként nagyobb szikla méretű objektumok (azaz meteorok), valamint (fotonok formájában) a csillagok távoli sugárzása bombázza, hanem folyamatosan ki van téve nagyenergiájú töltött részecskék áramlatának is. Ezeket a részecskéket összefoglaló néven kozmikus sugárzásnak nevezzük. A kozmikus sugárzás vizsgálatának mind a tudomány, mind a gyakorlati élet szempontjából nagy jelentősége van. A világ számos pontján működik olyan detektor- és észlelőhálózat, ahol a kozmikus sugárzás által keltett másodlagos sugárzást vizsgálják. A tudósok többek között olyan kérdésekre keresik a választ, mint például honnan erednek a kozmikus sugárzás részecskéi, mi az összetételük, illetve hogy milyen fizikai mechanizmusok állnak az ilyen nagy energiával rendelkező részecskék gyorsítása mögött.

¹Eötvös Loránd
Tudományegyetem,
Csillagászati
Tanszék, Budapest
²HUN-REN-SZTE
Sztelláris Asztrofizika
Kutatócsoport, Baja
³HUN-REN
Wigner Fizikai
Kutatóközpont,
Budapest

Természetesen ezek magyarázatára mostanra már számos elmélet és modell született, azonban minden elméletnek vannak gyenge pontjai, illetve a technológia fejlődésével a sugárzás természetének újabb és újabb részletei tárulnak elénk, amelyek további kutatásokat tesznek szükségessé. Mint azt már megjegyeztük, a kozmikus sugárzás kutatása nemcsak az elméleti tudósok számára fontos, hanem a mindennapi életünkben is jelen van és hatással is lehet rá. A földi élővilágot folyamatosan érő háttérsugárzás több mint tíz százaléka a kozmikus részecskék által kiváltott másodlagos sugárzásból származik, amelyek részecskéi – a kozmikus részecskékhez hasonlóan – töltéssel is rendelkezhetnek. Ezek a töltött részecskék akár a mindennapokban használt elektronikai eszközeinkben is okozhatnak problémát, de a magasan keringő műholdak fedélzeti számítógépeit is veszélyeztethetik. Ezen ismertebb hatások mellett a kozmikus sugárzás ionizáló hatása károsíthatja a sejtek DNS-ét, mutációkat előidézve bennük. Ezért a magasabban keringő űrállomásokon dolgozó asztronauták esetében, akik jobban ki vannak téve ennek a sugárzásnak, további védelmet kell biztosítani.

Szintén érdekes, bár jóval hosszabb távon érvényesülhet a kozmikus sugárzás földi klímára gyakorolt hatása, hiszen a töltött részecskék befolyásolhatják a légkör elektromos tulajdonságait. Ezek összefüggésben állnak a felhőképződéssel, így befolyásolva a légkör mélyebb rétegeibe és a földfelszínre jutó napsugárzás teljesítményét. Végül érdekességként megemlítjük, hogy a kozmikus sugárzás elősegíthet olyan kémiai reakciókat, amelyek új molekulákat, akár az élet számára fontos aminosavakat vagy nukleotidokat hozhatnak létre, így a sugárzás akár szerepet is játszhatott a földi élet kialakulá-

sában. A fentiek alapján láthatjuk, hogy a kozmikus sugárzás, illetve annak változásai hosszú távon hatással lehetnek az életre, a biodiverzításra, vagy akár az evolúcióra is.

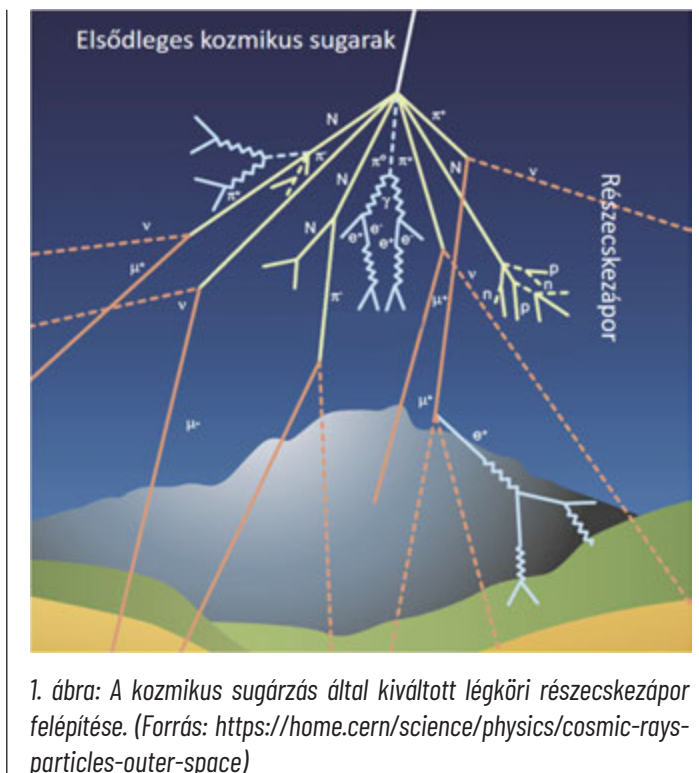
Hazánkban jelenleg nincsenek a kozmikus sugárzásra irányuló közvetlen mérések, de több kutatóhelyen is foglalkoznak a témához kapcsolódó vizsgálatokkal. Az ELTE Csillagászati Tanszékén a napaktivitással és a hozzá kapcsolódó jelenségekkel, mint például a napkitörésekkel és a koronaanyag-kidobódásokkal foglalkoznak. Ezek számottevően járulhatnak hozzá a kozmikus sugárzás részecskéinek gyorsítási és terjedési mechanizmusához. Emellett már régóta ismert a kozmikus sugárzás és a napaktivitás kapcsolata, amelyről több tanulmányban is olvashatunk [1–3]. Egy másik kutatóhely hazánkban a Wigner Fizikai Kutatóközpont, ahol különböző űrküldetések részecskedetektorainak fejlesztésében vesznek részt, illetve az adataik elemzésével járulnak hozzá a Nap körüli térrész mágneses tulajdonságainak megismeréséhez, és az ott lévő plazmakörnyezet feltérképezéséhez.

A kozmikus sugárzás eredete és mérése neutronmonitorokkal

A földi légkörbe érkező nagysebességű részecskék, vagyis a kozmikus sugárzás elsődleges forrása központi csillagunk, a Nap. Azonban ahogy egyre nagyobb energiájú részecskéket detektáltunk, fel kellett ismernünk, hogy ezen részecskéket már sokkal extrémebb folyamatok kell, hogy gyorsítsák, és valószínű forrásaik is egyre távolabbi objektumok lehetnek. Ha csoportosítani szeretnénk a kozmikus sugárzást, akkor a három fő típust alapvetően az őket létrehozó asztrofizikai folyamatok alapján különíthetjük el:

- **Szoláris kozmikus sugárzás:** a Naptól származó, főleg protonokból és elektronokból álló sugárzás, amelynek intenzitását és összetételét a Nap aktivitása határozza meg. Az ilyen típusú részecskék jellemzően a 100–500 MeV energiatartományba esnek.
- **Galaktikus kozmikus sugárzás:** a Naprendszeren kívülről érkező, főleg protonokból, héliumatommagokból és nehezebb atommagokból álló sugárzás, amelynek terjedését és spektrumát a galaxis mágneses mezeje befolyásolja. Energiaszintjük általában a 0,5–100 GeV közötti tartományban van.
- **Ultranagy energiájú kozmikus sugárzás:** ezek az Univerzum legnagyobb energiájú részecskéi, amelyek energiája akár a 10^{20} eV-ot is elérheti. Eredetük még nem tisztázott, de valószínűleg extragalaktikus forrásokból származnak, például aktív galaxismagokból, kvazárokból vagy gamma-kitörésekből.

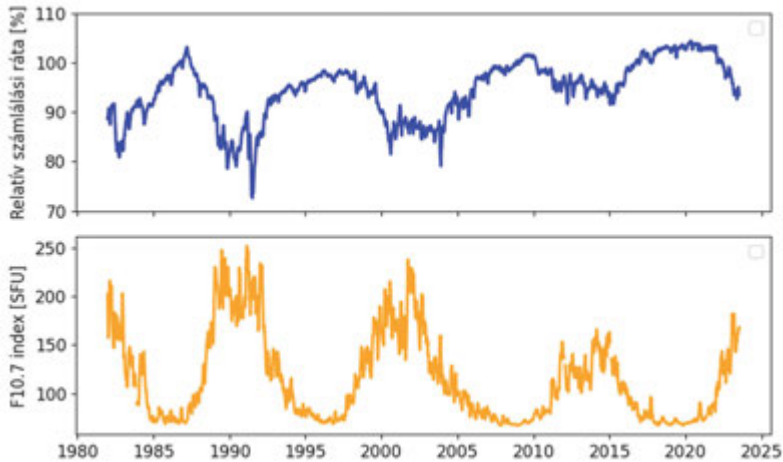
A kozmikus sugárzás tehát a világűrből érkező nagyenergiájú részecskék áramlata. Amikor ezek a részecskék belépnek a Föld légkörébe, akkor az azt alkotó atomokkal és molekulákkal ütköznek, másodlagos részecskéket hozva létre. Ezek a másodlagos részecskék alkotják az ún. kozmikus eredetű részecskezápороkat, amelyek végül eljutnak a földfelszínig (1. ábra). Ezen másodlagos részecskék között vannak neutronok is, amelyek semlegesek (nincs töltésük), ezért a Föld mágneses mezeje nem téríti el őket. Ezeket a neutronokat különböző neutronmonitorokkal tudjuk detektálni, ahol az észlelt neutronok száma és energiája természetesen függ az elsődleges kozmikus sugárzás intenzitásától és összetételétől, de befolyásolja a földi légkör állapota és összetétele is. Bolygónk számos pontján



található olyan mérőeszköz, amely a kozmikus sugárzás másodlagos részecskezapórában kialakuló neutronokat detektálja. A különböző változások bemutatásához mi a Lomnici-csúcson található neutronmonitor adatait használjuk fel, illetve olyan különleges jelenségeket is kiválasztunk az idősorból, amelyek elsősorban szoláris eseményekhez köthetőek. A Lomnici-csúcson (Szlovákiában, 49,40° északi szélességnél és 20,22° keleti hosszúságnál, 2634 m tengerszint feletti magasságban) található neutronmonitor (LMKS) folyamatos, 42 éves adatsora lehetővé teszi a kozmikus sugárzás fluxusában mutatkozó hosszú távú trendek vizsgálatát a kb. 4 GeV feletti energiatartományban. Emellett az 1981 óta elérhető órás, valamint a 2001 óta rendelkezésre álló perces időbeli felbontás lehetővé teszi a neutronmonitor mérési eredményeit befolyásoló, rövid időintervallumon lejátszódó események vizsgálatát is.

A neutronadatok idősora a napaktivitás tükrében

A Nap aktivitásában bekövetkező változásokat hagyományosan a Nap felszínén megjelenő napfoltok, vagy más névvel aktív területek számával jellemezzük. A napfoltok a napbelső mélyebb rétegeiből fel-törő mágneses erővonal kötegek, amelyek a felszint mintegy átdöfve hozzák létre a foltokat. A napfoltok megjelenésének helye attól függ, hogy a mélyben fekvő mágneses fluxuscsövek hol haladnak meg

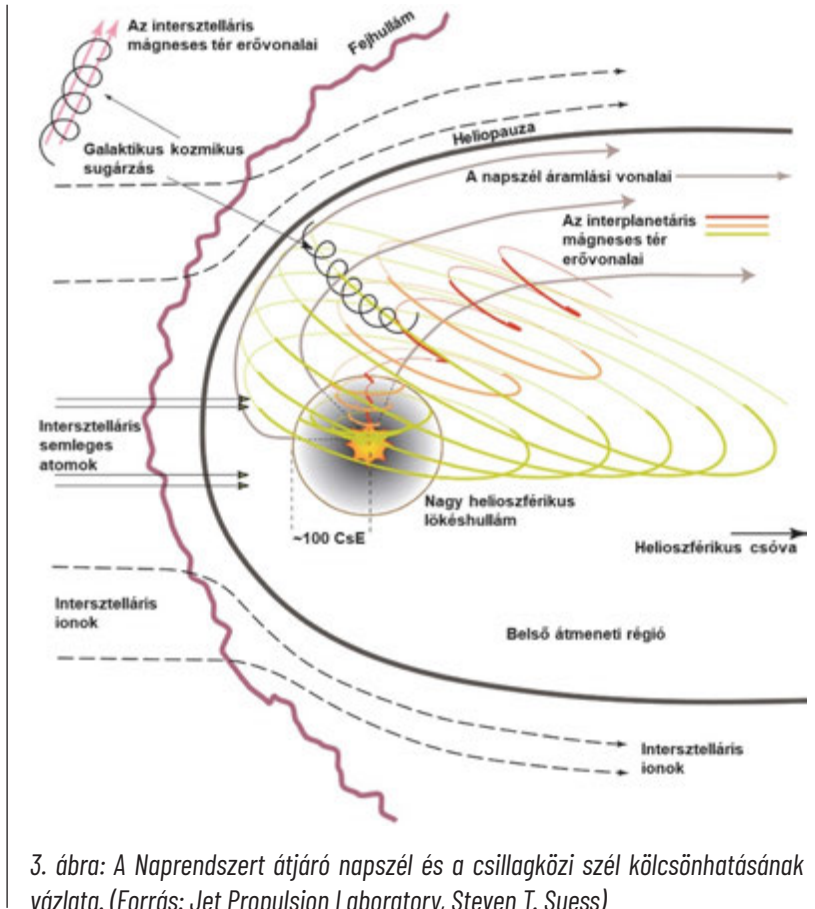


2. ábra: A kozmikus sugárzás Lomnici-csúcson mért fluxusa (felső panel) és a Nap rádiósugárzásának fluxusa (alsó panel) az 1981-2023 közötti mérési időszakon ábrázolva, 30 napos futóátlagokkal. 1 SFU (Solar Flux Unit) = $10^{-22} \text{ W m}^{-2} \text{ Hz}^{-1}$

egy kritikus térerősség értéket. Emiatt a napfoltok száma kevésbé tükrözi a Nap globális mágneses terében bekövetkező egyéb változásokat, illetve akár az aktív területek környezetében zajló további jelenségeket, mint például napkitöréseket. A fentiek miatt gyakran a napfolt-relativszám helyett egy globálisabbnak tekinthető aktivitási mérőszámot használnak, a Nap 10,7 cm-es rádiófluxusát, amelyet F10.7 indexnek is neveznek. Az F10.7 index a napkorongon jelen lévő összes lehetséges forrás 10,7 cm hullámhosszon (2800 MHz frekvencián) kibocsátott sugárzásának egy óra alatt mért értéke. Ez a mennyiség így valójában egy fluxussűrűség, de mégis a köznyelvben fluxusként emlegetik. Érdekeséggként még megemlítjük, hogy a 10,7 cm-es hullámhossz kiválasztása véletlenszerűnek tekinthető, és a második világháború alatti radarfejlesztés történetében gyökerezik. Mindenesetre a korai mérések megerősítették, hogy a 10 cm körüli hullámhosszak a legalkalmasabbak a naptevékenység szintjének nyomon követésére, mivel ezeken a hullámhosszokon a sugárzás nagyon érzékeny a naplégkör különböző rétegeiben – azaz a felső kromoszférában és a napkorona alján – uralkodó fizikai viszonyokra. Ha ábrázoljuk az F10.7 index értékét és ugyanazon időszakban a lomnici neutronmonitor méréseit, már szemmel is jól látható a két adatsor közötti antikorreláció (2. ábra).

Természetesen a kapott eredményeket különböző statisztikai módszerek is megerősítik, ezzel a szerzők is foglalkoztak, például egy tudományos diákköri munka keretében. Az antikorreláció ebben az esetben tehát azt jelenti, hogy amikor Napunk aktivitási maximuma közelében jár, a Naprendszerbe kívülről érkező kozmikus sugárzás intenzitása csökken, míg az aktivitási minimum időszakában az átlaghoz képest növekedni fog. Ha az okokat keressük, akkor kicsit mélyebbre kell ásunk ahhoz, hogy megértsük, központi csillagunk hogyan befolyásolja a kozmikus sugárzás intenzitását. Ehhez kozmikus környezetünket nem korlátozhatjuk a nagybolygók által bejárt tartományra, hanem helyette a helioszférát

kell alapul vennünk, amelyet a Naptól kiáramló plazma vagy más néven napszél ural (3. ábra). Ennek a tartománynak a határa messzire nyúlik, több mint százszorosa a Nap-Föld-távolságnak.



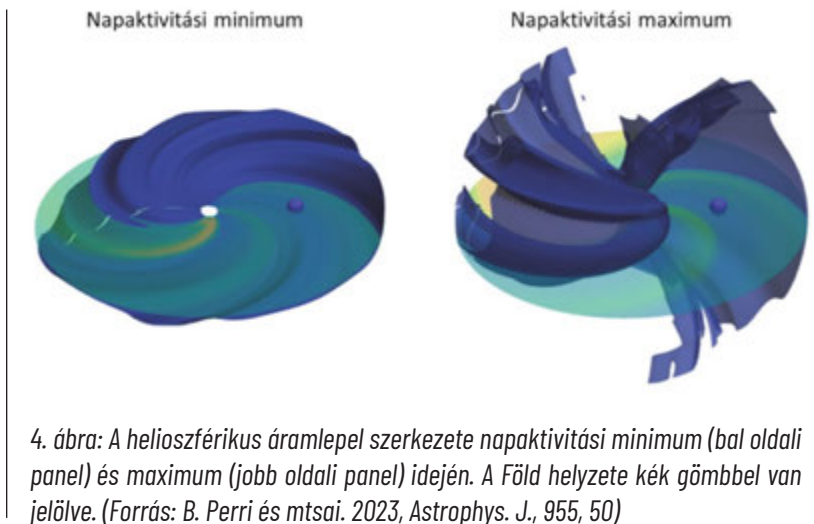
3. ábra: A Naprendszert átjáró napszél és a csillagközi szél kölcsönhatásának vázlata. (Forrás: Jet Propulsion Laboratory, Steven T. Suess)

Ezt a szférát veszi körbe a más csillagokból, távoli objektumokból származó, részben ionizált csillagközi gáz, amelytől a heliopauza választja el. Ezt a területet veszi körül a külső plazmahüvely (angolul *outer heliosheath*), vagyis a Nappal együtt mozgó helioszférát körüláramló, eredeti mozgásirányától eltérített csillagközi ionizált gáz, míg a semleges összetevők nagyrészt behatolnak a helioszférába. Azt a területet, ahol a napszél lelassul és kölcsönhatásba lép a csillagközi gázzal, átmeneti régióknak vagy belső plazmahüvelynek (angolul *inner heliosheath*) nevezzük. Mivel Napunk is mozog a csillagközi térben és így az áramló csillagközi gázhoz képest is, valamint sebessége nagyobb a csillagközi gázban érvényes Alfvén-sebességnél¹, ezért a külső plazmahüvelyt a zavartalan csillagközi gáztól is egy többé-kevésbé éles határfelület, az úgynevezett fejhullám (angolul *bow shock*) vagy külső lökeshullám

¹ Az Alfvén-sebesség a plazmafizikában használt sebesség, amely megadja, hogy milyen gyorsan terjedhetnek a mágneses perturbációk a plazmában, és függ a plazma sűrűségétől, illetve a mágneses térerősség értékétől.

választja el, ahol tulajdonképpen a csillagközi gáz ionizált komponense lassul szubszonikussá. A heliopauzán belül egy másik lökéshullámfront is kialakul, az úgynevezett nagy helioszférikus lökéshullám (angolul *termination shock*), ahol a napszél plazma mozgási energiája nagyrészt hőenergiává alakul, és a napszél szubszonikussá lassul. A heliopauza helyzetét tehát alapvetően a napszél és a csillagközi gáz ionizált komponensének nyomásegysége határozza meg.

A napszél a Nap legkülső légköri rétegéből, a koronából származik, ahol a plazma, vagyis az ionizált gáz mozgását a bonyolult szerkezetű és időben változó szoláris eredetű mágneses tér határozza meg. A Nap felszínéhez közeli régiókban a legtöbb erővonal hurkot formál, így mindkét talppontja a felszínhez kapcsolódik, viszont ahogy egyre távolodunk, a napszél mozgási energiája egyre dominánsabb lesz, így a napszél mintegy magával ragadja és „kifújja” az erővonalakat, amelyek így a napszéllel együtt nagyjából sugárirányban sodródnak kifelé. Viszont a Nap forgása miatt az erővonalak – amelyek talppontjai továbbra is a Naphoz kötődnek – feltekerednek, kialakítva egy arkhimédészi spirált, ahol a spirál emelkedését a Nap forgási sebessége és a napszél sebessége együttesen alakítja. Emellett a Nap mágneses tere 11 évente polaritást vált, amit a különböző aktivitási mutatókban, mint például a napfoltszámban és az F10.7 rádiófluxusban is megfigyelhetünk. A kétféle polaritást elválasztó felület, az úgynevezett áramlepel az aktivitási minimum környékén a heliografikus egyenlítő síkjának közelében helyezkedik el. Azonban az aktivitás maximumához közeledve az áramlepel és az ekliptika síkja egyre nagyobb szöget zár be egymással, míg végül a maximum tetőpontján a pólusváltással egyidejűleg az áramlepel darabokra szakad (4. ábra).



4. ábra: A helioszférikus áramlepel szerkezete napaktivitási minimum (bal oldali panel) és maximum (jobb oldali panel) idején. A Föld helyzete kék gömbbel van jelölve. (Forrás: B. Perri és mtsai. 2023, *Astrophys. J.*, 955, 50)

Tovább bonyolítja a képet, hogy a napszél sebessége is változik attól függően, hogy milyen heliografikus szélességeken lép ki a napkoronából. Az egyenlítői tartományokban a napszél sebessége nagyságrendileg 400 km/s, míg magasabb szélességeken, az úgynevezett koronalyukak esetében ez az érték már a duplájára nő, akár a 800 km/s-ot is eléri. Ezen régiók alatt a napkorona alacsonyabb hőmérsék-

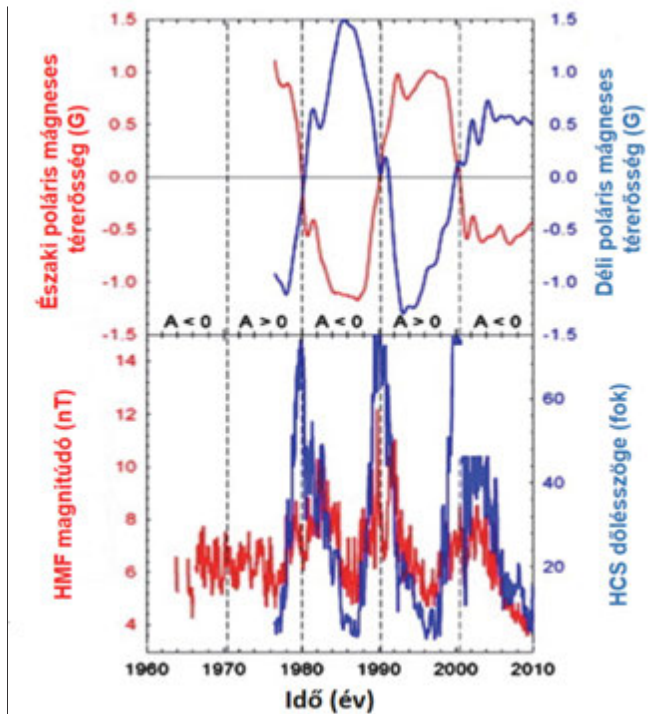
letű és gyengébb röntgenintenzitású területeit értjük, ahol a mágneses erővonalak részben felnyílnak, így ezen tartományokból „könnyebben”, azaz nagyobb sebességgel tud kiáramlani a napszél. Ugyan a koronalyukak általában csak magasabb heliografikus szélességeken, a pólusok körül jelennek meg, de a napaktivitás csökkenésével lejjebb húzódhatnak, kiterjedhetnek, vagy akár önálló struktúrává válhatnak, így az egyenlítő közelébe is kerülhetnek. A kétféle sebességű napszélnyaláb azimutálisan is változik. Emellett ahol a gyors napszél utoléri a lassú komponenst, kompresszió alakul ki.

Abban az esetben, ha a nyomásgradiens kellően erős és a sebességkülönbség meghaladja a lokális Alfvén-sebességet, akkor a kezdeti nyomáskülönbség lökésfreonttá alakulhat. Ez jellemzően körülbelül másfél csillagászati egység távolságban következik be. Ha az eltérő sebességű napszél-tartományok forrása nem változik a Nap több forgási periódusa alatt sem, akkor a kialakult kompressziós csúcsok vagy lökeshullámok is együtt forognak a Nappal. Ezen lökésfreont-tartományokat az angol elnevezésük alapján CIR-eknek (*Corotating Interaction Region*) vagy együttforgó kölcsönhatási tartományoknak hívjuk, és fontos szerepük van a helioszférán belüli részecskék gyorsításában.

A fentiek alapján láthatjuk, hogy egy igen bonyolult, komplex rendszerként írható csak le a Nap kozmikus környezete, ahol különböző fizikai mechanizmusok és kölcsönhatások befolyásolják az ebbe a térrészbe kerülő részecskék mozgását. Ezért összefoglaló elnevezéssel helioszférikus modulációnak szoktak nevezni a kozmikus sugárzás intenzitását befolyásoló minden olyan hatást, amelyet központi csillagunk, a Nap okoz. Ha a napszél hatását vizsgáljuk „csak” a helioszférában és környezetében, akkor a legegyszerűbben egy taszító potenciáltérrel tudjuk közelíteni. Ebben az esetben feltételezzük, hogy a helioszférába érkező részecske a helytől és időtől függően, a részecske töltésével arányos energiát veszít; minél közelebb van a Naphoz a részecske, annál többet. Ha egy protont veszünk példának, akkor ez az energiavesztés 100 MeV nagyságrendű, és Napunk aktivitásának fokozódásával tovább nő. Ez az egyszerű leírás sok helyzetben jól alkalmazható, de számos hatást figyelmen kívül hagy, mint például a helioszféra gömbszimmetriktól eltérő szerkezetét, időbeli változásait, különböző részecskegyorsítási effektusokat, töltésfüggő modulációkat.

Mint azt már említettük, a lomnici neutronmonitor a 4 GeV feletti energiatartományban érzékeny, így elsősorban a galaktikus eredetű kozmikus sugárzásból származó másodlagos részecskéket tudja detektálni. Ez azt jelenti, hogy a részecskezápott kiváltó elsődleges részecskének a földpálya közelében ennél nagyobb energiával kell rendelkeznie, a néhány száz MeV alatti galaktikus kozmikus sugárzásból származó protonok általában be sem jutnak a földpálya közelébe. A fentiek tükrében a 2. ábrán megfigyelhető moduláció a kozmikus sugárzás által keltett másodlagos neutronintenzitásban már könnyebben értelmezhető. Az ábrán megfigyelhetjük azt is, hogy a napaktivitás növekedésével a kozmikus sugárzásban végbemenő csökkenés bizonyos késleltetéssel következik be. Ennek oka abban keresendő, hogy a napszélnek közel egy évre van szüksége arra, hogy a helioszféra határáig eljusson. Így a naptevékenység növekedésekor elég hosszú idő telik el, amíg a perturbált mágneses terek a külső helioszférában is akadályozzák a részecskék bejutását. Az időeltolódás mellett egy másik érdekes jelenség, hogy a napciklust ellentétes fázisban, de mégis jól követő változás időbeli lefolyása is más, vannak hegyesebb és laposabb maximumok. E mögött a Nap 11 éves mágneses pólusváltása húzódik

meg, amely ciklust a helioszférikus mágneses mező² is követ, irányát szintén 11 évente változtatva, ami egy 22 éves mágneses ciklust eredményez. A szokásosan $A > 0$ -val jelzett pozitív polaritású korszakok olyan időszakok, amikor a mágneses térerősség vektor az északi féltekéjén kifelé mutat, míg a déli féltekén befelé (5. ábra). Ezt úgy is meg lehet fogalmazni, hogy a Nap északi féltekén mért poláris térerősség értéke $A > 0$ esetén pozitív, míg $A < 0$ esetében negatív értéket vesz fel, miközben a déli vidéken ennek pont az ellenkezőjét tapasztaljuk.



5. ábra: A Naphoz kapcsolódó mágneses paraméterek változása az időben. A felső panelen az északi és a déli poláris mágneses térerősség látható, míg az alsó panelen a helioszférikus mágneses tér (HMF) magnitúdója és az áramlepel (HCS) dőlésszöge a Föld környezetében. (Forrás: M.S. Potgieter és mtsai. 2013, J. Adv. Res, 4, 259)

Mint ahogy azt már írtuk, a két ellentétes polaritást elválasztó felület az áramlepel, amely a naptevékenység fokozódásával egyre hullámosabbá válik. Ezt a hullámosságot egyrészt az okozza, hogy a Nap mágneses tengelye szöget zár be a forgástengelyhez képest. Ez megegyezik azzal a szöggel, amely-

² A magyar szakirodalomban inkább az interplanetáris mágneses tér (angolul *interplanetary magnetic field*, IMF) kifejezés terjedt el, de mivel itt a teljes helioszférán belül uralkodó mágneses viszonyok a lényegesek, amelyek túlmutatnak a bolygóközi mágneses téren, ezért most ezt a kifejezést használjuk.

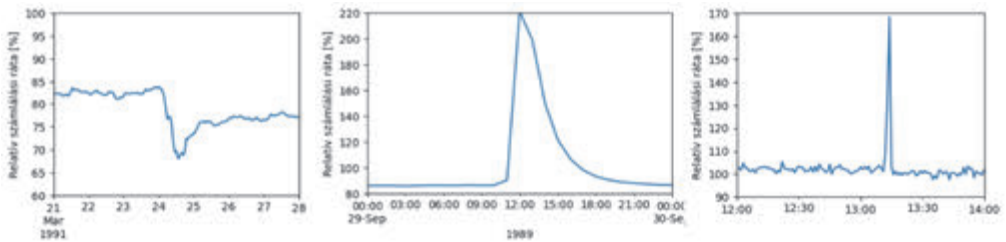
lyel az áramlepel megdől. Emellett tovább bonyolítja a képet, hogy a Nap mágneses terének egy ferde dipól térrel való közelítése nem minden helyzetben helytálló, bár sok szempontból az interplanetáris tér szerkezetének tárgyalásakor jó közelítést ad. A kozmikus sugárzással foglalkozó kutatók gyakran használják ezt a dőlésszöget a napaktivitás indikátoraként: α alapján a naptevékenység minimum közelében van, ha $5^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ$, az aktivitás közepes erősségű, ha $30^\circ < \alpha \leq 60^\circ$, és maximális vagy ahhoz közeli, ha $60^\circ < \alpha \leq 90^\circ$. Mivel a napszél magával ragadja a mágneses erővonalakat, ezért az α értékét és változásait az egész helioszférába továbbítja.

Ezek után térjünk vissza arra, hogy miért figyelünk meg a kozmikus sugárzás időbeli lefolyásában különbségeket az egymást követő aktivitási ciklusokban. A megfigyelések azt mutatják, hogy az $A < 0$ időszakokban a neutronmonitor eseményeinek intenzitása csúcsos és keskeny, míg az $A > 0$ ciklusokban a profilok sokkal kevésbé csúcsosak, inkább laposabbak. Tulajdonképpen a kozmikus sugárzás részecskéi reagálnak a helioszférikus mágneses tér görbületére és gradiensére, valamint az áramlepel változásaira. Az $A < 0$ polaritási ciklusban az éles csúcsok megfelelnek azoknak az időpontoknak, amikor a Föld áthalad az áramleplen és a helioszférikus mágneses tér előjelet vált. Az áramlepel gátként hat a kozmikus részecskék számára, különösen a pozitív töltésűekre, ezért intenzitásuk alacsonyabb a lepel egyik oldalán, mint a másikon. Amikor a Föld áthalad az áramleplen, akkor a sugárzás intenzitása hirtelen megváltozik, csúcsot képezve a profilban. Amikor $A > 0$, akkor az áramlepel kevésbé hatékony akadályt képez a részecskék számára, különösen igaz ez a negatív töltésű részecskékre. Így a kozmikus sugárzás intenzitása fokozatosabban változik, ahogy a Föld keresztülhalad a helioszférikus mágneses tér szektorain. A szektorok $A > 0$ esetén a Nap egyenlítőjéhez igazodnak, így a Föld kevesebb szektorhatáron halad át, mint $A < 0$ esetén, amikor a szektorok a Nap egyenlítőjéhez képest ferdek. Fontos megjegyezni, hogy az itt bemutatott jelenségek és a hozzájuk kapcsolódó intenzitásra gyakorolt hatás a kozmikus sugárzás energiáinak növekedésével egyre csökken, a 30 GeV energianál nagyobb részecskék esetében már igen csekélynek mondható. Szintén lényeges megemlíteni, hogy a moduláció tényleges időbeli lefolyását erős napaktivitás esetén az úgynevezett koronaanyag-kidobódások vagy angol rövidítéssel élve CME-k (*Coronal Mass Ejection*) is befolyásolják. Ezek a legtöbb esetben nagyobb napkitörésekhez köthetőek, amelyek során szintén nagyobb mennyiségű napanyag lökődik ki a bolygóközi térbe, lépcsőszerű szerkezetet adva az intenzitáscsökkenésnek.

A neutronok adatsorában megfigyelhető különleges események

Az előzőekben bemutatott helioszférikus moduláció mellett a kozmikus sugárzás által keltett neutroneseményekben jóval rövidebb idő alatt lejátszódó, az átlagtól eltérő eseményeket is találhatunk. Először áttekintjük, milyen jelenségeket azonosíthatunk (6. ábra), utána rátérünk a mögöttük húzódó fizikai folyamatokra is.

Forbush-csökkenés (FD – *Forbush decrease*): az esemény során a kozmikus sugárzás intenzitásában pár napos átmeneti csökkenés figyelhető meg, ahol a csökkenés egy rövid, pár óráig tartó időszak alatt következik be, és amplitúdója legtöbbször néhány százalék, de időnként akár több tíz százaléknyi

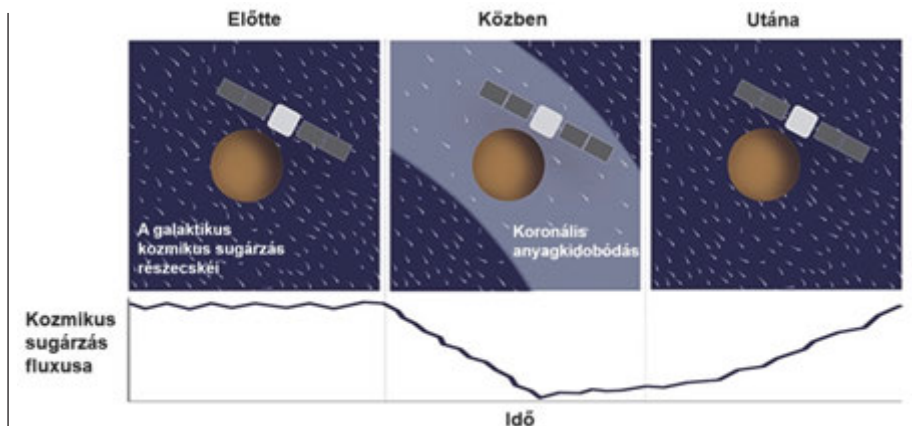


6. ábra: A neutronmonitor idősorában azonosítható különleges események. Bal oldali panel: Forbush-csökkenés (FD); középső panel: talajszintközeli sugárzástöbblet (GLE), jobb oldali panel: viharok közelében kialakuló sugárzástöbblet (TGE)

is lehet. A Forbush-csökkenés egy fontos jellemzője, hogy globálisan megfigyelhető, azaz a Földön elhelyezett más neutrondetektorok is rögzítik [4,5].

Talajszintközeli sugárzástöbblet (GLE – ground level enhancements): a jelenség során a kozmikus sugárzás intenzitásában egy hirtelen bekövetkező és igen intenzív növekedést észlelünk. A kozmikus sugárzásban megfigyelhető fluktuációktól, ingadozásoktól eltérően a GLE-k rövid és éles csúcsokat mutatnak, néhány százaléktól pár tíz százalékig terjedő amplitúdóval. A hirtelen fluxusnövekedés igen rövid időskálán, 10 perctől egy-két óráig tart, míg a lecsengési fázis ennél hosszabb [6-10].

Viharok közelében kialakuló sugárzástöbblet (TGE – thunderstorm ground enhancements): ez a jelenség nagyon rövid időskálán lezajlik, általában pár percen keresztül figyelhető csak meg. A TGE során a neutronintenzitás növekedése jellemző, amelynek nagyságrendje általában nem haladja meg a tíz százalékot [11]. Ugyanakkor dokumentáltak már olyan eseteket is, amikor a változás során a háttér szint a többszörösére növekedett [12,13]. E jelenséggel kapcsolatosan fontos hangsúlyozni, hogy

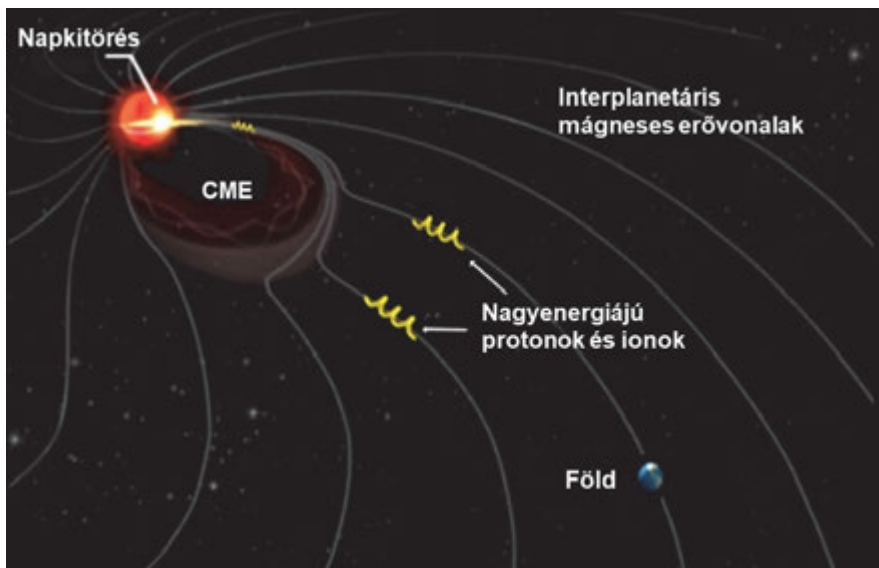


7. ábra: A Forbush-csökkenést előidéző koronaanyag-kidobódás (CME) hatásának sematikus ábrázolása. (Forrás: <https://sci.esa.int/web/solar-system/-/59397-cosmic-ray-drop>)

lokális jelenségről van szó, illetve elsősorban magas hegytetőkön, nagyobb magasságokon manifesztálódik, vagy akár téli viharok során a japán tengerpart mentén [14–16].

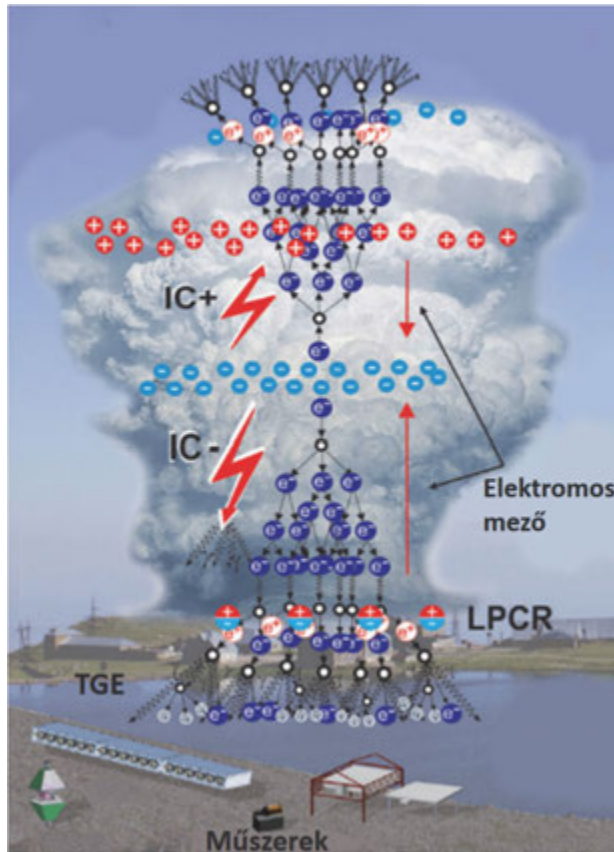
Az itt bemutatott különleges jelenségek közül az első kettő szoláris eseményekhez köthető, míg az utolsó lokális, meteorológiai változásokhoz. Az első jelenség, a Forbush-csökkenés hátterében Forbush munkái alapján [4,5] a geomágneses mező torzulásai állnak. Ezeket a zavarokat napkitörések, koronakidobódások (CME), nagy sebességű plazmaáramlások vagy más aktív folyamatok után a Napon vagy közvetlen környezetében kialakuló lökéshullámok terjedése kényszeríti ki, melyek a bolygóközi térben is továbbterjednek. A kiváltott mágneses zavarok visszaverik vagy szétszórják a helioszférán keresztülhaladó kozmikus részecskék egy részét, mintegy leárnyékolva a sugárzás egy kisebb hányadát (7. ábra). Fontos megjegyeznünk azonban, hogy néhány esetben a Forbush-csökkenéshez nagyon hasonló változások geomágneses viharok nélkül is megfigyelhetők, illetve a különböző geomágneses zavarok által kiváltott eltérő FD-k esetében sem teljesen tisztázott a pontos fizikai folyamat.

A következő, szintén szoláris eseményekhez köthető változás a talajszintközeli sugárzástöbblet, amikor a földi detektorok által rögzített kozmikus sugárzás intenzitása hirtelen megnövekszik. A jelenséget az eddigi vizsgálatok alapján a Napból származó több tíz GeV-os részecskék, az úgynevezett SEP-ek (angolul *Solar Energetic Particles*) okozzák, amelyek erős napkitörésekhez és/vagy koronanyag-kidobódásokhoz kapcsolódnak, azonban a gyorsítási mechanizmus, amely létrehozza ezeket a nagyenergiás részecskéket, pontosan nem ismert (8. ábra). Ami megkülönbözteti az átlagos SEP eseményt a GLE-t kiváltótól, az az, hogy ezek a részecskék már olyan nagy energiákkal rendelkeznek, hogy képesek elérni a Föld felszínét. Ezért a GLE-ekkel kapcsolatos SEP fluxusokat gyakran két



8. ábra: Szoláris eredetű nagyenergiás részecskék, azaz SEP-ek kialakulásának egy lehetséges modellje. (Forrás: <http://spaceweather.uma.es/solarstorms.html>)

különböző spektrális fázissal jellemzik: egy lágyabb fázissal, amelyet a MeV-os tartományba tartozó közepes energiájú részecskék dominálnak, és egy keményebb fázissal, amelyet a GeV-os tartományba tartozó nagyenergiájú részecskék uralnak. A lomnici neutronmonitor-adatok esetében csak a GLE-k kemény fázisát lehet észlelni a 4 GeV-os levágási ridegségnek köszönhetően. A hasonló keletkezési mechanizmusok ellenére nem minden esetben figyelhetők meg együtt a GLE-k és a Forbush-csökkenések, sőt az esetek többségében egyszerre csak az egyik látható a neutronmonitorok adataiban. Ennek és a két jelenség között fennálló pontos fizikai kapcsolatnak a magyarázata még nem tisztázott a szakirodalomban.



9. ábra: Zivatarhoz kapcsolódó töltött struktúrák és részecske-áramlások, illetve részecskelavinák. A piros nyilak a légköri elektromos mezőket és a villámokat mutatják. (Forrás: A. Chilingarian 2014, *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.*, 107, 68)

Utolsóként említjük a TGE-ket, amelyek nem szoláris, hanem lokális jelenséghez köthetők, és az aktuális időjárási viszonyok segítik elő létrejöttüket. A viharok közelében kialakuló sugárzástöbbit (9. ábra) esetén a neutronfluxusban megfigyelhető emelkedés nagyon rövid időskálán játszódik le, és pár

percen keresztül figyelhető csak meg. A TGE-k előfordulásának korrelációja erős a magas elektromos térerősség értékekkel, ami arra utal, hogy potenciális eredetük a viharban keletkező relativisztikus elektronlavina (*relativistic avalanche of runaway electrons* – RREA) fékezési sugárzása lehet, ahogy azt Gurevich és munkatársai javasolták [17]. Egy másik lehetőség, hogy a villámkisülésben vagy annak környezetében történik a részecskekeltés és gyorsítás. Annak ellenére, hogy a villámkisüléseket jelenleg erős részecskegyorsítóként tartják számon, annak fizikai mechanizmusa, hogy a kisülés hogyan hoz létre nagyszámú relativisztikus részecskét, még mindig vita tárgyát képezi. Emellett vannak olyan vizsgálatok, amelyek alapján a közelben bekövetkező villámcsapásokkor a TGE-k megszűnnek [11,18], így az eredetükkel kapcsolatos képet ez tovább bonyolítja.

Zárszó

Kozmikus környezetünk feltérképezése és vizsgálata rengeteg kihívást tartalmaz, és még több erőfeszítésre van szükség ahhoz, hogy a felmerült kérdésekre megoldást találjunk. A kozmikus sugarak felfedezése óta jelentős lépéseket tettünk a sugárzás kialakulásához kapcsolódó, valamint a helioszférában lejátszódó fizikai folyamatok megértése terén. Változatos módon tudunk már mintát venni plazmakörnyezetünkből, hiszen nemcsak a földi mérések állnak rendelkezésünkre, hanem számos űrküldetés is segítségünkre van, amelyek adatait a földi mérésekkel kombinálva betekinthezünk ebbe az igen komplex világba. Folyamatosan vizsgáljuk a napszél globális tulajdonságait, méréseket végzünk és modelleket állítunk fel arra, hogy a csillagközi tér hogyan befolyásolja a helioszférát. Tanúi voltunk annak is, amikor a Voyager szondák átlépték a helioszféra határát. Ezek jelenleg már az intersztelláris plazma tulajdonságairól továbbítanak értékes adatokat. Ebben a tanulmányban elsősorban a földi mérések segítségével, neutronmonitor-adatok felhasználásával mutattuk be azt a kapcsolatot, amely a kozmikus sugárzás és központi csillagunk, a Nap között áll fenn, hiszen a több napciklust is felölelő idősorok egyelőre csak ilyen formában érhetőek el. De még sok a tennivaló, hiszen az emberiség a különböző űrküldetéseknek köszönhetően csak most kezdi felfedezni csillagkörnyezetét. Az egyre gyarapodó és változatos adatoknak köszönhetően – legyenek azok földi mérések vagy űreszközök adatai –, amelyeket egyre kifinomultabb numerikus modellekkel kombinálunk, kétségkívül új ismeretekkel és további izgalmas felfedezésekkel bővül majd tudásunk a kozmikus sugárzásról, a globális helioszféráról és a helioszférán belüli kölcsönhatásokról.

Irodalomjegyzék

- [1] Lockwood J.A. (1971): *Forbush decreases in the cosmic radiation. Space Science Reviews*, 12, 658
- [2] Barouch E., Burlaga L.F. (1975): *Causes of Forbush decreases and other cosmic ray variations. Journal of Geophysical Research*, 80, 449
- [3] Cane H.V. (2000): *Coronal mass ejections and Forbush decreases. Space Science Reviews*, 93, 55
- [4] Forbush S. (1937): *On the effects in cosmic-ray intensity observed during the recent magnetic storm. Physical Review*, 51, 1108

- [5] Forbush S. (1938): On cosmic-ray effects associated with magnetic storms. *Terrestrial Magnetism and Atmospheric Electricity*, 43, 203
- [6] Belov A. et al. (1996): Proton spectra of the four remarkable GLE in the 22nd solar cycle. *Radiation Measurements*, 26, 461
- [7] Bieber J. et al. (2004): Latitude survey observations of neutron monitor multiplicity. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 109, A12
- [8] Kudela K. et al. (2009): Cosmic ray measurements in High Tatra mountains: 1957–2007. *Advances in Space Research*, 44, 1166
- [9] Berrilli F. et al. (2014): The relativistic solar particle event of may 17th, 2012 observed on board the international space station. *Journal of Space Weather and Space Climate*, 4, A16
- [10] Battarbee M. et al. (2018): Multi-spacecraft observations and transport simulations of solar energetic particles for the may 17th 2012 event. *Astronomy & Astrophysics*, 612, A116
- [11] Chum J. et al. (2020): Significant enhancements of secondary cosmic rays and electric field at the high mountain peak of Lomnický Stit in High Tatras during thunderstorms. *Earth, Planets and Space*, 72, 1
- [12] Dwyer J. et al. (2014): The physics of lightning. *Physics Reports*, 534, 147
- [13] Chilingarian A. et al. (2010): Ground-based observations of thunderstorm-correlated fluxes of high-energy electrons, gamma rays, and neutrons. *Physical Review D*, 82, 043009
- [14] Chilingarian A. et al. (2011): Particle bursts from thunderclouds: Natural particle accelerators above our heads. *Physical Review D*, 83, 062001
- [15] Kuroda Y. et al. (2016): Observation of gamma ray bursts at ground level under the thunderclouds. *Physics Letters B*, 758, 286
- [16] Slegl J. et al. (2022): Spectrometry of high-energy photons on high mountain observatory Lomnický Stit during thunderstorms. *Radiation Protection Dosimetry*, 198, 623
- [17] Gurevich A. et al. (1992): Runaway electron mechanism of air breakdown and preconditioning during a thunderstorm. *Physics Letters A*, 165, 463
- [18] Kudela K. et al. (2017): Correlations between secondary cosmic ray rates and strong electric fields at Lomnický Stit. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 122, 10

Napkutató az űrszondák mérés tükrében

Gálik Barbara¹,
Forgács-Dajka Emese^{1,2},
Pádár Noémi¹,
Bebesi Zsófia³

Több mint négy évszázad telt el azóta, hogy Galileo Galilei távcsövét a Napra irányította, és elkészítette az első rajzokat a Napon látható sötét foltokról. Az azóta eltelt idő alatt a napmegfigyelés hatalmasat fejlődött mind a technológia, mind az időbeliség szempontjából, hiszen azóta már digitálisan rögzítjük Napunk képét, rendszeresen és szisztematikusan jegyezzük le megfigyeléseinket. A felhalmozódott rengeteg észlelési adatnak köszönhetően felfedeztük a napaktivitás ciklikusságát, összefüggést találtunk az erős napkitörések és a Földön megfigyelhető sarki fény között, de előremozdította fizikai világképünk fejlődését is, hiszen olyan tudományágak, mint például a plazmafizika is merített a megfigyelések adta bőségből. A következő nagy lépést az űrtechnológia és a hozzájuk kapcsolódó vívmányok jelentették.

¹Eötvös Loránd
Tudományegyetem,
Budapest
²HUN-REN-SZTE
Sztelláris Asztrofizika
Kutatócsoport, Baja
³HUN-REN
Wigner Fizikai
Kutatóközpont,
Budapest

Természetesen több hipotézis is napvilágot látott, amelyek igyekeztek összekapcsolni a bolygóközi teret és a Nap felszínén megfigyelhető jelenségeket, de az elképzelések helyességének igazolására várni kellett az első űrszondák megjelenéséig. Már az 1930-as években elfogadták azt az elképzelést, hogy a Napon megfigyelhető kitörések, vagy flerek nagy sebességgel terjedő ionizált gázfelhő, vagyis plazmát lövellnek ki. Hatásuk akár a Föld környezetéig is terjedhet [1,2]. Ennek helyességét csak azután lehetett bizonyítani, hogy Eugene Parker 1958-ban megjósolta a napszél létezését [3]. A napszél nem más, mint a Nap felszínét elhagyó töltött részecskék plazmaárama, amely magával ragadja a Nap mágneses terét is, így a teljes bolygóközi teret átjárja, sőt még azon túl is kifejti hatását. Az elméletet végül négy évvel később a bolygóközi térbe kijutó űrszondák, a Luna-1 és a Mariner-2 mérésekkel is megerősítették [4–6]. Ezek és az őket követő szondák így több mint hat évtizede vizsgálják a bolygóközi tér tulajdonságait, a Nap-Föld-kapcsolatot. Az évek, évtizedek alatt ezek az ember által alkotott eszközök már más bolygókhoz is eljutottak és méréseik segítségével már más égitestek magnetoszférájának Naphoz kötődő vonatkozásait is tanulmányozhatjuk. Az utóbbi évtizedben pedig megtettük azt a „még nagyobb lépést”, melynek nyomán nemcsak a bolygóközi térbe, hanem a csillagok közé érkeztünk. Űrszondáink, a Voyager-1 és a Voyager-2 átlépték a Nap által uralt tartomány, a helioszféra határát, és valóban kijutottak a csillagközi térbe, ahonnan folyamatosan küldik még most is a felbecsülhetetlen értékű adatokat.

A fentiekből kitűnik, hogy a Napnak és környezetének megfigyelése tudományos szempontból rendkívüli jelentőséggel bír, de ha hétköznapiabb dolgoknál szeretnénk maradni, és megérteni, hogy nemcsak az elméletek szempontjából érdekesek a kapott adatok, akkor egy igen híres példával szeretnénk ezt megmutatni. Ez pedig az 1859-es úgynevezett Carrington-esemény, amely talán az írott történelem eddigi legintenzívebb geomágneses vihara volt [7]. A korabeli írások alapján olyan szemképráztató fényjelenségeket figyeltek meg szerte a világon, amelyek túlmutattak a megszokott sarki fényeken. A feljegyzések alapján az északi fényt (*aurora borealis*) egészen délen Kubáig és a hawaii Honoluluig, míg

a déli fényeket (*aurora australis*) egészen északon a chilei Santiagóig látták. Sok ember számára ez volt az első alkalom, hogy szemtanúja volt az égbolt ilyen felfénylésének. Egyesek azt hitték, elérkezett a világ vége, míg mások, meghallva az ébredező madarak csiripelését, azt hitték, napfelkeltét látnak. De nemcsak ezekről a színpompás fényjátékokról olvashatunk, hanem arról is, hogy a korabeli technológiákban milyen pusztítást végzett a vihar, ugyanis a kezdetleges elektromos hálózatok túltöltődtek, a táviróhálózat elhallgatott, sőt a távirógépekből szikrák záporoztak, több kezelő áramütést kapott, és a kipattanó szikrák tüzet is okoztak. Az eset Richard Christopher Carrington angol csillagászról kapta a nevét, aki kollégájával, Richard Hodgsonnal ezzel egy időben a napkitörést és napfoltok megjelenését dokumentálta [7]. A Carrington-esemény gyakran szolgál figyelmeztetesként arra, hogy mi történhet, ha egy hasonlóan erős napkitörés újra bekövetkezne. Ez óriási pusztítást okozhatna az emberi civilizációban, amely ma már nagymértékben függ az elektromos technikától, a számítógépektől, a digitális kommunikációtól és a műholdaktól. Az ilyen eseményekre való felkészülés egyik fontos iránya az űridőjárás előrejelzése, amihez nélkülözhetetlen ismernünk a jelenségek mögött húzódó fizikai folyamatokat. Ehhez elengedhetetlen a Napon lejátszódó aktivitási jelenségek minél szélesebb spektrumon történő megfigyelése, modelljeink komplex megközelítése. Fontos hangsúlyoznunk, hogy lehetetlen elválasztani az űrküldetések segítségével elért eredményeket a földi megfigyelésektől, illetve az elméleti és a numerikus modellezés során születettektől. De mivel ez a tanulmány az űrszondák, űrobszervatóriumok eredményeit szeretné bemutatni, ezért most ezekre helyezzük majd a hangsúlyt.

Telepítsünk az űrbe!? – Előnyök és hátrányok

Mielőtt rátérnénk a különböző küldetések ismertetésére, röviden nézzük meg, milyen előnyei vannak, ha a megfigyelőeszközeinket a földfelszín helyett az űrbe helyezzük el:

- 1. A megfigyelésre alkalmas hullámhossztartomány kiterjesztése.** A földi légkör gyakorlatilag átlátszatlan az ibolyántúli (UV), az extrém ultraibolya sugárzás (EUV) és a lágy röntgensugárzás számára, emellett az infravörös (IR) tartomány esetében is csak néhány keskeny sávon történik átengedés. Így az elektromágneses spektrum nagy része nem éri el a földfelszínt, és a magas hegyvonulatokra telepített obszervatóriumok, vagy a léggömbök segítségével a földi légkör magasabb tartományába felbocsátott eszközök csak marginálisnak tekinthető kiterjesztést tesznek lehetővé.
- 2. Nagy felbontású és/vagy folyamatos lefedettség.** A Napon lejátszódó különböző jelenségek tanulmányozásához gyakran többórás, -napos vagy -hetes folyamatos megfigyelés szükséges. Bizonyos esetekben a földi telepítésű megfigyelési hálózatok, amelyek a világ több pontjáról végeznek megfigyeléseket, biztosíthatják ezt a folyamatosságot, de abban az esetben ez lehetetlen, ha a megfigyeléseket olyan hullámhosszakon kell végezni, melyek nem hatolnak át a földi légkörön, vagy meteorológiai események – mint például felhőképződés – akadályozzák a Napból érkező sugárzás felszínre jutását.
- 3. Megbízható megfigyelési feltételek.** A földi megfigyelések esetében, még ha nagyon előnyös helyre is – például magas hegyre, száraz környezetbe stb. – van telepítve a távcső, számolnunk

kell, angol szakkifejezéssel élve, az úgynevezett „seeing”-gel. Ez tulajdonképpen a földi légkör turbulens voltából eredő torzításokat takarja, azaz, hogy a távcsőben látott kép mennyire „nyugodt”. Ennek kiküszöbölésére több technikai megoldás is született, amelyek közül talán a legismertebb az adaptív optika, amelyet földi naptávcsövek esetében is alkalmaznak. Viszont ha eljuttatjuk a megfigyelésre használt eszközünket a földi légkörön túlra, akkor a „seeing”-gel, mint tényezővel már nem kell számolnunk, és ez nagyon jó minőségű képalkotást tesz lehetővé.

Az itt felsorolt, igen jelentősnek mondható előnyökkel szemben számos probléma is felmerül, amikor a Nap megfigyelésére szánt berendezéseinket az űrbe szeretnénk telepíteni:

- 1. Korlátozások a tömegre, méretre, teljesítményre és a telemetriai sebességre vonatkozóan:** mivel eszközeink űrbe juttatásakor le kell küzdenünk a földi gravitációt, alaposan mérlegelnünk kell a hasznos tömeg mértékét a rá fordítandó üzemanyag függvényében, melynek költségei a felbocsátandó tömeggel igen gyorsan gyarapodnak. Ha végül sikerrel ki is juttattuk eszközünket az űrbe, akkor ott a működéshez szükséges energiával kell ellátnunk, illetve a kapott mérési adatokat vissza is kell juttatni a Földre, ahol ezután indulhat csak el érdemben a tudományos munka. Ezek megvalósítása mind költséges, és gyakran a költségvetési korlátok erősen határt szabnak a műszernek is.
- 2. Mérnöki és tervezési követelmények:** igen magas szintű, komplex mérnöki szakértelemre van szükség a műszerek megtervezéséhez, amelyeknek túl kell élnie a felbocsátást és az űrbéli környezetnek való kitettséget.
- 3. A műszerek módosítása és/vagy fejlesztése:** általában nehéz vagy inkább lehetetlen elérni a felbocsátás után egy szondát és a rajta elhelyezett műszereket, így a további fejlesztések vagy akár a meghibásodások javítása leggyőzhetetlen korlátokba ütközik.

Láthatjuk, hogy a Nap megfigyelése űreszközök segítségével igen nehéz, kockázatos és költséges. Ez azt jelenti tehát, hogy műszert csak akkor helyezünk az űrbe, ha a kitűzött tudományos célt nem lehet megvalósítani földfelszíni műszerek segítségével. Ezzel kapcsolatosan a második világháborút követő időben, amikor az űrverseny is kiéleződött, valamint nagy áttörések voltak az elméleti napfizikai kutatások terén, az amerikai űrügynökség, a NASA egy műhelybizottsága az 1960-as években a következő megállapítást tette: „Egyértelmű, hogy a Napon megfigyelhető jelenségek 1/10 ívmásodperc szögfelbontású fényképezésére vagy más módon történő rögzítésére már most szükség van, és nagy előrelépést jelentene a napfizikai kutatásokban. Ezt a kívánalmat sem a földi telepítésű, sem a jelenleg tervezett napfizikai űrszondákkal nem lehet megvalósítani. Nincs oka annak, hogy miért ne lehetne az OAO (*Orbiting Astronomical Observatory*) számára fejlesztett irányítási és stabilizáló technikákat egy napobszervatórium számára is adaptálni. Egy ilyen űreszköz kifejlesztése a Nappal foglalkozó csillagászok számára a következő fontos feladat, amelyet a NASA aktívan támogat.”

Fontos hangsúlyozni, hogy a második világháborút követő időkben, az 1960-as évek elejére már több mint száz szuborbitális rakétarepülés volt, amelyek a Nap UV, extrém UV (EUV), röntgen- és gamma-spektrumát készítették el, de ezeknek a repüléseknek nem a Nap volt az egyetlen célpontja. A korai rakéták közül sokat a Föld felső légkörében és magnetoszférájában lévő elektromágneses me-

zők és az ott jelen lévő részecskék mérésére szántak, de például a Pioneer és Mariner szondák átrepültek a bolygóközi téren is, méréseket készítve a helioszférában, miközben a Hold és más bolygók felé tartottak. Nagyszerű spektrumok készültek a Napról a 300 Å feletti hullámhosszokon és a 2–60 Å közötti röntgentartományban. A visszatérő egységek fedélzetén a Nap Lyman- α és Lyman- β spektrroheliogramjai filmekben megörökítve kerültek a tudósok kezébe. Ezen űrfigyeléseket kombinálva a földi obszervatóriumokban készített Ca II K (az egyszerűen ionizált kalcium egy jellegzetes vonala) spektroheliogramokkal sikerült egy újabb aspektusát feltárni a Nap csendes és aktív régiói közötti különbségeknek. Az UV, EUV és röntgenspektrumok az atomfizikusok számára is aranybányák voltak, és olyan újabb laboratóriumi technológiák kidolgozását tették szükségessé, amelyek alkalmasak a Napon felfedezett magasan ionizált állapotok közötti átmenetek vizsgálatára.

A James A. Van Allen csoportja által fejlesztett, a kozmikus sugárzást mérő eszközök, az Explorer űrszondák a Föld magaslégréjében felfedezték a sugárzási öveket, amelyek új érdeklődést váltottak ki a Földhöz közeli jelenségek fizikája és a Nappal való esetleges kapcsolata iránt [8]. Érdekességként említjük, hogy Van Allen erősen szorgalmazta a világháború során fejlesztett német V2-es rakéták tudományos céllal történő felhasználását is [9]. Az itt felvillantott eredmények esetében a rakéták és műholdak megfigyelési fókuszában olyan hullámhossztartományok álltak, amelyeket csak a földi légkörön kívül lehetett tanulmányozni. Ellenben a fenti, 1960-as években tett megállapítás vetette el annak a magját, hogy a világűrben végzett megfigyelések ne korlátozódjanak csak az ilyen jellegű megfigyelésekre, hanem a teljes spektrumra terjedjenek ki. Sajnos több mint 40 évet kellett várni arra, hogy egy nem túl nagy, közel félméteres apertúrával rendelkező optikai naptávcső megfigyeléseket végezzen az űrben. Ez volt a Solar Optical Telescope (SOT), amely a Hinode műholdon kapott helyet, indítására pedig Ucsinourából (Uchinoura) került sor, a JAXA/ISAS japán űrügynökség háromfokozatú, szilárd hajtóanyagú M-5 rakétájával, 2006. szeptember 22-én. Mindezek ellenére űreszközeink segítségével a Napról szerzett ismereteink folyamatosan bővültek, sőt váratlan felfedezések is születtek. A következőkben röviden, időrendben, küldetésről küldetésre haladva mutatjuk be a Napra irányuló űrbeli kutatási programokat. Mivel azonban ezen küldetések száma már több mint száz felett jár – és ezekbe nem számoljuk bele azokat, amelyek fő feladatuk mellett mintegy járulékosan végeztek napmegfigyeléseket –, kiragadunk pár, fontosabb küldetést. Mielőtt rátérnénk a különböző napmegfigyelő műszerek részletezésére, néhány megkerülhetetlen, úttörő űreszköztől is ejtenénk pár szót.

A műholdas napmegfigyelések első két évtizede – az 1960-as és 70-es évek

Mint azt már említettük, az 1960-as évekre már számos olyan küldetés volt, melynek eredményeképpen a Napról addig soha nem látott felvételek születtek. De az első, célzottan a Nap megfigyelésére felbocsátott eszköz az Orbiting Solar Observatory-1 (OSO-1) [10], amelyet a későbbiekben még hét követett. Az 1962. március 7-én elindított műholdat egy nagyjából kör alakú pályára állították, kb. 575 km magasságban, ahol 1038 alkalommal kerülte meg Földünket, miközben folyamatosan gyűjtötte és továbbította az adatokat. Sajnos a fedélzeti adatrögzítők meghibásodását követően csak az állomások fölötti áthaladások során érkeztek valós időben a Földre adatok. Az OSO-1 küldetés elsődleges céljai a

következők voltak: (1) a Nap elektromágneses sugárzásának vizsgálata a spektrum ultraibolya és röntgentartományában, illetve (2) a fedélzeten elhelyezett napmegfigyelő műszer iránytartásának meghatározása, azaz mennyire pontosan lehet – például a képalkotás során – a távcsövet a kijelölt pozícióban tartani. A másodlagos tervek a továbbiak voltak: (1) a napsugárzás mérése keskeny sávú szűrőkkel, hogy a spektrum meghatározott régióit tanulmányozhassák; (2) gamma-sugárzás mérése a 0,1 és 500 MeV közötti energiatartományban; (3) neutronmérések a Földről és a Naptól származó neutronáram meghatározására; (4) a Naptól származó UV, röntgen- és gamma-sugárzás időbeli változásainak tanulmányozása; (5) az űreszköz hőmérsékletének szabályozására szolgáló, a felszínt borító anyagok vizsgálata, valamint (6) a becsapódó bolygóközi porszemcsék impulzusának és kinetikus energiájának mérése. Említettük, hogy az OSO-1-et még hét műhold követte. Az Orbiting Solar Observatory tehát egy amerikai űrteleszkópprogram volt, amelynek elsődleges célja a Nap tanulmányozása volt, de a rajta elhelyezett műszereknek köszönhetően nemcsak a napfizikus társadalom örülhetett, segítségével felvirágzott ugyanis a röntgen- és gamma-tartományú csillagászat is [11,12]. Az OSO segítségével készült felvételek megmutatták az aktív régiók és a szupergranulák határainak lenyomatát a 300 és 2000 Å közötti spektrumvonalak sorozatában, ami lehetőséget adott a különböző hőmérsékleti tartományok vizsgálatára is. Mivel a képeket digitálisan rögzítették, így azok a későbbiekben is összehasonlíthatók voltak. Addig ismeretlen részleteit tárták fel a napléggkör rétegeinek, a fotoszférától kezdve a kromoszféra felsőbb részéig. Az OSO sorozat összes szondája tartalmazott egy „kerékhez” hasonló alkatrészt, amely akár 15 fordulat/perc sebességgel is foroghatott, biztosítva az iránystabilitást, és



1. ábra: Az OSO-3 űrszonda szerelés alatt. (Forrás: Ball Aerospace)

egy stabilizált, pörgésmentes platformot, amely a Napra irányított képképző műszereket hordozta. Ez az elrendezés a ma használatos háromtengelyes stabilizációs technikák korszaka előtt lehetővé tette a kiváló, ívperc körüli pontosságot és stabilitást, ami igen részletes, jó felbontású képeket eredményezett. Ilyenekre korábban nem volt példa. Az OSO-2 vitte az első koronográfit a világűrbe [13], míg az OSO-3 (1. ábra) által gyűjtött adatok segítségével állapították meg a napkitörések, az azokat kísérő röntgen- és III. típusú rádiókitörések, valamint a földi ionoszférában hirtelen bekövetkező változások közötti kapcsolatot. Emellett, mint említettük, nemcsak a napmegfigyelések terén hozott újdonságot, de az OSO-3 észlelt először röntgenkitörést a Scorpius X-1 forrás felől [14].

A korai OSO küldetések egyike sem volt képes tanulmányozni a 100 és 300 Å közé eső színek tartományt, mivel a műholdakhoz használt anyagok fényvisszaverő tulajdonságai erősen korlátozták az ebben a tartományban történő észleléseket, holott ez a tartomány kritikus fontossággal bír a kromoszféra és korona közötti kapcsolat megértéséhez. Ez a NASA első emberes űrállomásprogramjával, a Skylabbal gyorsan megváltozott [15]. Az 1973. május 14-én indított Skylab három fő részből épült fel: (1) a legnagyobb egység az *Orbital Workshop* (OWS) volt, az élet színtere, ahol a legénység aludhatott, dolgozhatott és a különböző kísérletek is itt folytak; (2) ehhez illesztették az *Airlock Module*-t (AM), amely magába foglalta az életfenntartó, távközlési és egyéb fontos rendszereket, illetve a tervezett űrséták kiinduló helyeül szolgált; (3) végül a dokkoló egység egy állványzatára szerelték az űrállomás egyik legfontosabb műszerét, a Napot megfigyelő űrobszervatóriumot, az *Apollo Telescope Mount*ot (ATM).

Sajnos indításkor levált az űrállomás külső borításának egy darabja, így elveszett a hőpajzs, emellett a levált rész magával ragadott egy napelemtáblát is, így a sérülten pályára állt űrállomás válságos állapotba került. Mindössze hét nap alatt sikerült a NASA mérnökeinek kidolgozni egy eljárást, amelynek segítségével a Skylab megmenekülhetett. Ennek keretében az első legénységnek egy aranyozott napvédő fóliát kellett kifeszítenie a sérült rész fölé (2. ábra), illetve a meghibásodott maradék napelemtáblákat rendbe kellett hozniuk, hogy a megfelelő energiaellátást is biztosítani lehessen. Végül sikeresnek bizonyult a javítás, és a Skylab még hat éven át adott otthont sikeres emberes küldetéseknek, kísérleteknek és a Nap folyamatos, nagy felbontású megfigyelésének.

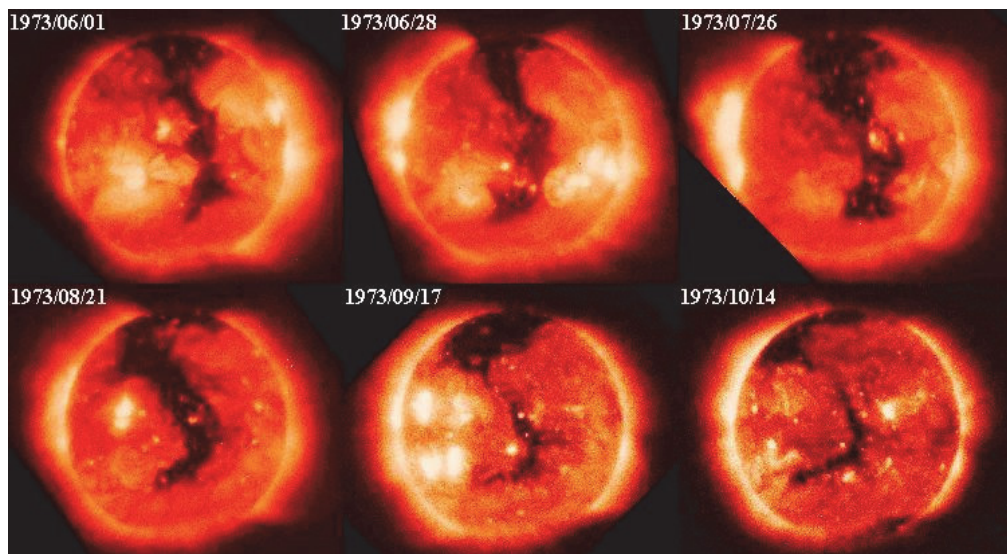
Az ATM iránystabilitása 2 ívmásodperc volt, szemben az OSO műholdak néhány ívpercnyi pontosságával. Az ATM nyolc, egymással összehangolt műszert szállított, melyek tudományos adatait nagyrészt filmre rögzítették. A filmre történő rögzítés olyan nagy térbeli, spektrális és időbeli felbontású megfigyeléseket tett lehetővé, amelyek a korábbi küldetéseken a telemetria korlátai miatt nem voltak lehetségesek. Film nélkül nem lehetett volna olyan nagy felbontású adatokat szerezni, mint amilyeneket az ATM műszerei produkáltak. Az ATM-nek volt egy pán célszobája, amelyben a filmeket helyezték el, és ebben a teremben lévő kazettákat cserélték a Skylab űrhajósai a küldetések során, illetve hozták vissza a Földre. Néhány műszer olyan nagy felbontású videót is rögzített, amelyet a legénység vezérlőpultján jelenítettek meg. A műszerek által készített videók és képek, valamint a napkitörésekre figyelmeztető jelzések lehetővé tették a legénység számára, hogy az ATM-et a kiválasztott területre irányítsák és ott a különböző hullámhossztartományokban mérési sorozatot készítsenek. Ez a „képesség”, hogy valós időben reagálhassanak a napkitörésekre, jelentősen megnövelte a küldetés tudományos teljesítményét. A



2. ábra: A Skylab űrállomás. Jól látszik a javítás utáni sérült rész fölé feszített aranyozott fólia, amely a hőpajzs szerepét töltötte be. (Forrás: NASA)

Skylab koronográfja segítségével a koronaanyag-kidobódásokról, azaz a CME-kről (*coronal mass ejection*) készült felvételek lehetőséget adtak a kilökődő plazma sebességének meghatározására, illetve kapcsolatot lehetett felállítani a rádiókitörések és a CME-k sebessége között. A CME-k időbeli követése lehetőséget adott arra, hogy a bolygóközi térben azonosítsák a lökeshullámokat. A sebességadatok azt is megmutatták, hogy egyes CME-k a Naptól távolodva felgyorsulnak, ami azt sugallta, hogy más mozgatóerők is jelen vannak, nemcsak a felszínen megfigyelhető napkitörések. A sorozatfelvételek felvették azt a kérdést is, hogy a flarek okozzák-e a CME-ket, vagy mindkét jelenség egy közös esemény szülötte. A teljes napkorongról a 150–600 Å közötti színtartományban egyidőben készült felvételek lehetővé tették a kutatók számára, hogy lássák, hogyan változik a Nap légköre rétegről rétegre, a felső

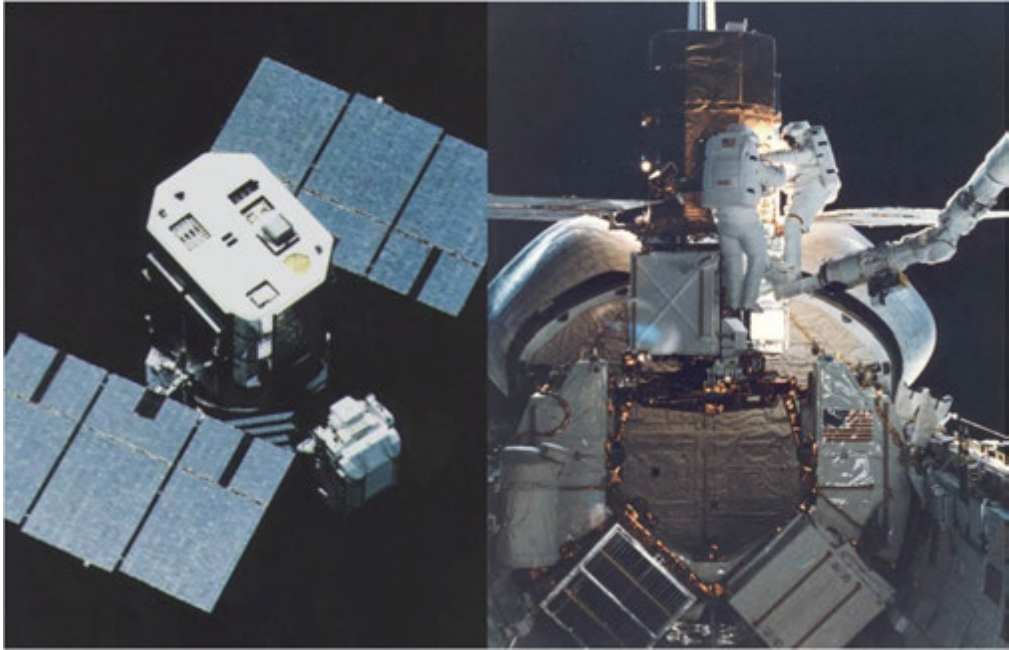
fotoszférától egészen a koronáig. Nagyon sok részletre fény derült, de mégis nyitott kérdés maradt a kromoszférát és koronát fűtő fizikai folyamat. Akkoriban az egyik legérdekesebb megfigyelés a kromoszféra és korona közötti átmeneti régióba vagy egészen a koronába felnyúló hurkok felfedezése volt. A hurkok időnként különböző aktív területeket kapcsoltak össze, sőt előfordult olyan is, amikor az egyenlítő két ellentétes oldalán lévő aktív régiókat kötötték össze.



3. ábra: A Skylab műszerével készített felvétel a napkoronáról. A sötét területek az úgynevezett koronalyukak. (Forrás: NASA)

A röntgenfelvételek segítségével a Nap felső légkörében új struktúrákat fedeztek fel, a koronalyukakat és a röntgenfényes pontokat (3. ábra). A koronalyukakban, amelyek a felvételeken sötét területeknek látszanak, a korona anyaga ritkább és hűvösebb, mint a környező koronában. A röntgenfényes pontok ezzel szemben kicsi, kompakt, rövid ideig tartó felfénylések, amelyeket legkönnyebben a koronalyukakban azonosíthatunk. A visszahozott filmfelvételek alapján egy másik érdekes megfigyelés volt, hogy a koronalyukak meglehetősen mereven forognak és a napfelszín forgási sebességének változása ellenére akár több, átlagosan 27 napig tartó körforguláson keresztül is megőrzik alakjukat. Nem tudunk minden felfedezést részletezni, de biztosan állíthatjuk, hogy a Skylab vízválasztó volt a napmegfigyelések terén. Megmutatta egy olyan műszeregyüttes koncepcióját, amelyet úgy terveztek meg, hogy rendszerként működjön együtt, előre megtervezett tudományos programokat hajtson végre. Bár nem minden működött tökéletesen – mégha az előző mondatok ezt is sugallták –, mégis alapot adott a jövőbeni napfizikai űrobszervatóriumok számára. A másik nagyon fontos lépés inkább tudománypolitikai volt. Mivel a nyolc műszer több különböző intézmény égisze alatt született, ezért a maximális tudományos eredmény elérése érdekében a különböző műszerek adatait meg kellett osztani. Ugyan ez az adatmegosztás még belső volt, azaz csak a résztvevő intézetek között történt meg, mégis ez volt az első lépés a nyílt adatpolitika felé [15].

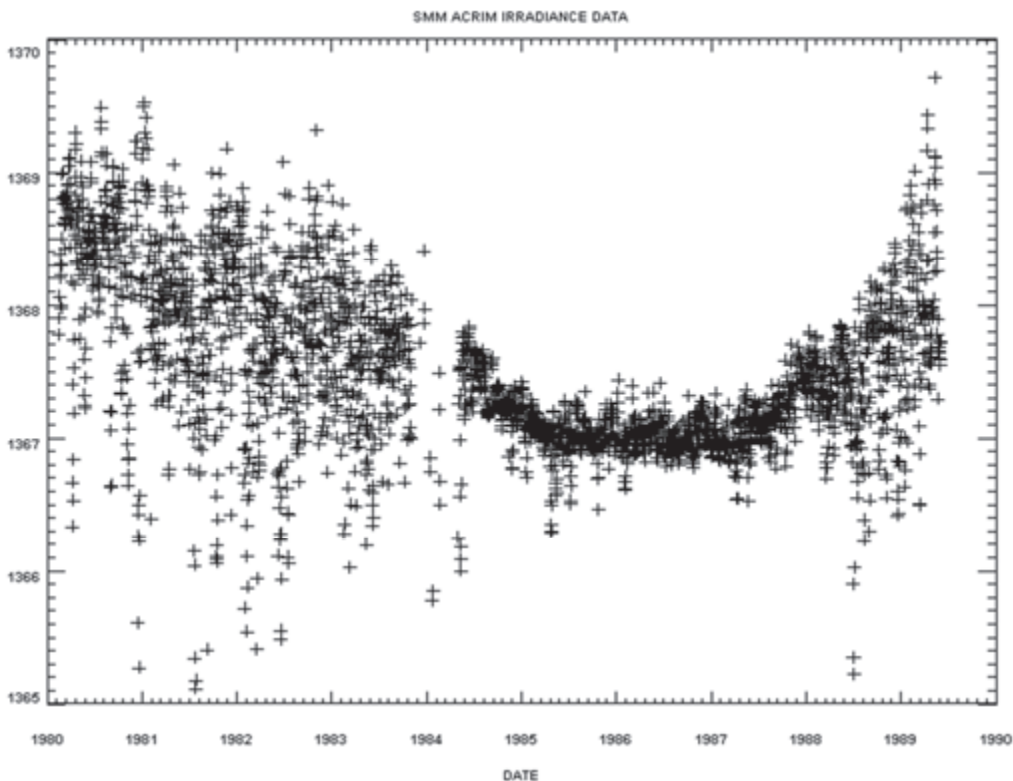
A nagyfelbontású képalkotás korszaka – az 1980-as évektől napjainkig



4. ábra: Az SMM műhold (bal oldali kép) és javítása 1984 áprilisában (jobb oldali kép). Ez történelmi esemény volt, ugyanis ez volt az első alkalom az űrrepülés történetében, hogy egy műholdat a pályáján javítottak meg. (Forrás: NASA)

Még az igazán nagy felbontású képalkotást végző műszereket megelőzte az 1980. február 14-én útnak indított Solar Maximum Mission (SMM) űreszköz (4. ábra), melynek elsődleges célja a napkitörések tanulmányozása volt [16]. A korábbi OSO műholdakkal ellentétben az SMM háromtengelyes stabilizálást használt, így az összes műszer ívmásodperces pontossággal és stabilitással figyelte a Napot, ezért már előszobának tekinthetjük az igazán részletgazdag képeket készítő műszerekhez. Mint ahogy a küldetés neve is tükrözi, a napaktivitási maximum idején volt hivatott méréseket végezni, ugyanis ebben az időszakban megnő a napkitörések gyakorisága, vizsgálatának legfőbb célpontja. Úgy gondolták, a korábbi küldetések során felmerült kérdést, amely a napkitörések és a koronaanyag-kidobódások kapcsolatára irányult, talán sikeresen megválaszolhatja. Ebből a célból az SMM képalkotást és spektroszkópiát végzett UV, EUV és röntgenhullámhosszakon, illetve a Skylabhez hasonlóan egy koronográfot is vitt magával. A napkitörések során a szupratermális energiára gyorsult elektronokat, illetve az általuk előidézett fékezési sugárzásból származó röntgensugárzást is észlelték. Az SMM-en volt az első olyan detektor, amely a röntgensugárakat 30 keV energiáig képes volt detektálni, ami jóval meghaladja az addig ismert legforróbb plazmák által termelt energiákat. A protonokat és a nehezebb ionokat, amelyek szintén nagy energiákra tettek szert a napkitörések során, a nukleáris gamma-su-

gáráz révén észlelték, amely a naplégkör alkotóelemeivel való kölcsönhatás során keletkezik. A napkitörésekkel és a CME-kkel kapcsolatos vitákat ugyan nem oldotta meg, de kibővítette a rendelkezésre álló adatok halmazát, ami részletesebb és pontosabb kérdésfelvetést tett szükségessé a tudományos közösségen belül. A napkitörésekhez kapcsolódó elképzelések kezdtek átalakulni, egyre jobban egybeolvastva, mintegy közös gyökeret keresve a „hagyományos fler”, a CME és a részecskeáram mögött húzódó folyamatoknak.



5. ábra: A napsugárzás időbeli változása az SMM ACRIM műszerével mérve. (Forrás: NASA)

Az SMM műszerei között találjuk az *Active Cavity Radiometer Irradiance Monitor* (ACRIM) sugárázmérőt is, amely nagy pontossággal rögzítette a Nap teljes energiakibocsátását (5. ábra). Ezt gyakran napállandónak is nevezik. Ezek a megfigyelések megmutatták, hogy amikor a napfoltok a látómezőbe fordulnak, akkor a Nap sugárzása gyengül, és fontos információkat szolgáltatnak a tompítás mértékéről. Viszont a mérések egy elsőre sokkal meglepőbb eredményt is mutattak, mégpedig azt, hogy a Nap valójában fényesebb a napfoltciklus maximumában, amikor több napfolt figyelhető meg a Nap felszínén. Ezen ellentmondás feloldása abban keresendő, hogy bár a napfoltok sötéteek és csökkentik a sugárzást, de körülöttük fényes fáklyamezők találhatóak, amelyek átlagosan bőven ellensúlyozzák a napfoltok miatti teljesítménygyengülést.

Ezen eredmények mellett a Nap intenzitásában észlelte a Nap 5 perces oszcillációját, így ezen globális oszcillációk jelenlétének kimutatása a Nap fényességében előrevetítette a Kepler-küldetés eredményeit. Mint említettük, az SMM-et 1980 februárjának elején indították, a naptevékenységi ciklus felszálló ágában. Sikeresen működött is 1980 novemberéig, amikor a stabilizáló rendszer meghibásodott, és nem tudta már a műszereket a Nap felé irányítani. A nem képalkotó műszerek tovább működtek, miközben az űreszköz lassan megpördült. 1984 áprilisában a Challenger űrrepülőgép küldetése keretében sikeresen megjavították (4. ábra), így az SMM további öt évig folytatta a munkáját, míg 1989 decemberében be nem lépett a Föld légkörébe, ahol megsemmisült [16].

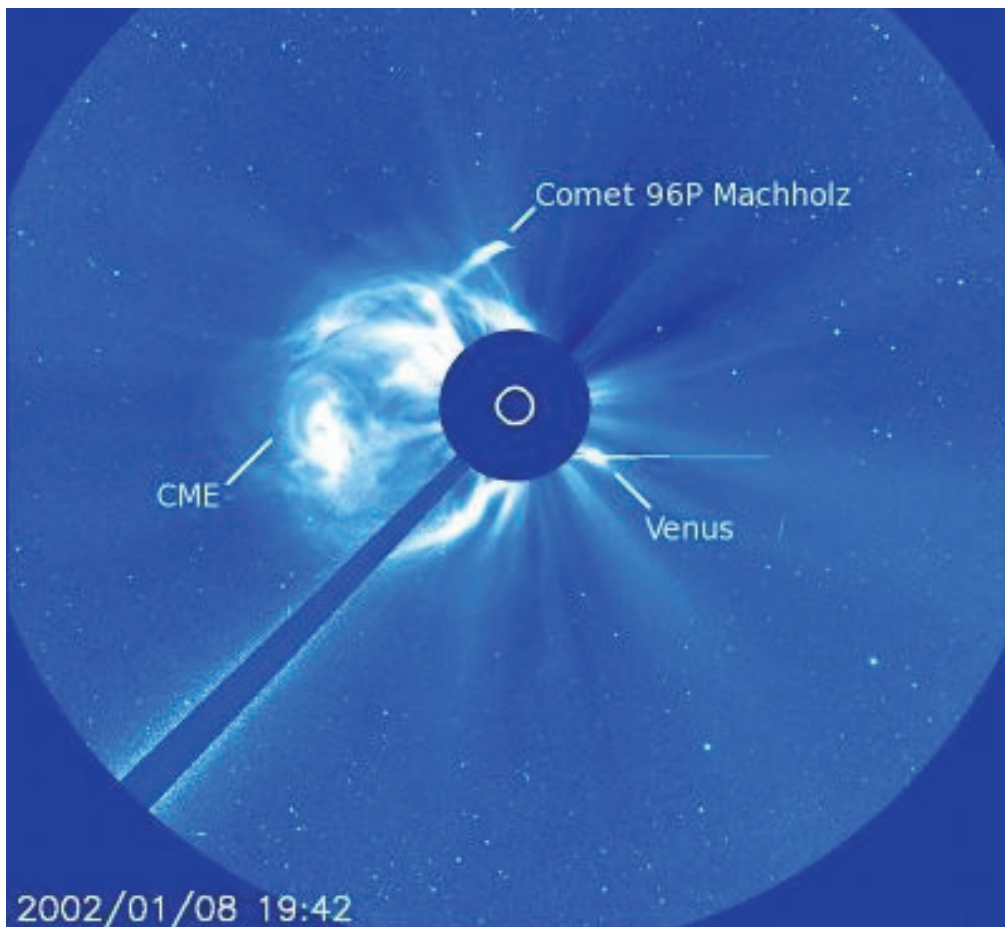
Nagyot ugrunk az időben, ami persze nem azt jelenti, hogy ne lett volna napmegfigyelésre szolgáló űreszköz ezen időszak alatt, de mint azt már többször is írtuk, nehéz bemutatni mindet. Következő időpontunk 1995. december 2., amikor útjára indult a Solar and Heliospheric Observatory (SOHO) nevű űreszköz [17]. A SOHO egy ESA/NASA küldetés, és az Európai Űrügynökség (ESA) Horizon 2000 tervének egyik sarokköve. Szép karácsonyi ajándéknak is volt tekinthető a napfizikával és/vagy Nap-Föld-kapcsolattal foglalkozó tudományos közösség számára. A SOHO által vitt műszerek legtöbbjét az ESA fejlesztette és integrálta, ezek kiegészültek a NASA által biztosított műszerekkel. A NASA Atlas-II rakétájával juttatták el a Nap-Föld-rendszer ún. L_1 pontjába, amely a Nap-Föld-egyenesen helyezkedő, a Nap felé eső egyik Lagrange-féle egyensúlyi pont. Helyét a Nap és a Föld gravitációs potenciálja határozza meg. Kitüntetett szerepe van az űrszondás megfigyelésekben, ugyanis innen folyamatosan megfigyelhető a Napunk. Emellett a Lagrange-pontok egyfajta parkoló pályát jelentenek az űrben, ahol a közelben lévő nagyobb égitesteknek az űreszközökre ható gravitációs ereje viszonylag kiegyensúlyozott keringési pályán tudja tartani a műszert. Mivel azonban az L_1 pont kb. 1,5 millió km-re van, ezért a SOHO-val történő kommunikáció biztosításához a Föld különböző helyein kell elhelyezni nagy antennákat. Ezt a NASA Deep Space Network rádióantenna-hálózata biztosítja.

A SOHO fedélzetén tizenkét műszer kapott helyet, így joggal érdemelte ki az obszervatórium megnevezést. A SOHO működését eredetileg 1998-ig tervezték, de annyira sikeres küldetés volt, hogy az ESA és a NASA többször is meghosszabbította, és számos küldetésbővítést hagyott jóvá [18]. 2020-ban ünnepelte indításának 25. évfordulóját, de még a mai napig is folyamatosan pásztázza a Napot és továbbítja a megfigyelésekről az adatokat. Három évvel a küldetés kezdete után, 1998 júniusában megszakadt vele a kapcsolat, miután egy sor helytelen parancsot adtak ki egy rutinmanőver során, és biztonsági üzemmódba kapcsol. Az űrobszervatóriummal való minden kapcsolatfelvételi kísérlet kudarcot vallott, és négy hétig senki sem tudta, hogy hol van. Úgy tűnt, hogy ez a páratlan obszervatórium örökre elveszett. Egy hónappal később egy a Földről indított erős radarjellel sikerült megtalálni az űreszközt, és kiderült, hogy még mindig a megfelelő pozícióban tartózkodik, és olyan szögben helyezkedik el, hogy a napfény a következő hónapokban újra a napelemtáblákra fog esni. Így végül az ESA és NASA mérnökeinek szeptember végére sikerült újra visszaállítania a SOHO normál működését, a műszerek pedig október végétől a megszokott módon továbbították az adatokat [19]. Ha ez nem lett volna elég, a SOHO iránytartásáért felelős három giroszkóp 1998 decemberére elromlott, így a mérnököknek egy új irányítást kellett kidolgozniuk, hogy az obszervatórium giroszkópok nélkül is képes legyen tartani a pozícióját. A feladatot 1999 elejére sikeresen megoldották. Ezzel a SOHO az első olyan űreszköz,

melynek háromtengelyes stabilitásáért nem giroszkópok felelnek [20]. A SOHO az ezt követő évtizedeket nagyobb problémák nélkül átvészelte, és máig minden műszere rendben működik. Az Európai Űrügynökség most már abban reménykedik, hogy ha ez így megy tovább, megérheti a harmincadik születésnapját is.

Visszakanyarodva a tudomány vizeire, tekintsük át, hogy milyen céllal indították útjára a SOHO-t. Egyik fő tudományos küldetése csillagunk, a Nap belső szerkezetének feltérképezése és a benne zajló változások megértése az észleléseken keresztül. Ehhez a Nap rezgéseit vizsgálja három műszerének segítségével, melyek a következők: GOLF (*Global Oscillations at Low Frequencies*), MDI (*Michelson Doppler Imager*) és VIRGO (*Variability of Solar Irradiance and Gravity Oscillations*). A második cél a naplégkör megfigyelése, különös tekintettel a kromoszférára, az átmeneti rétegre és a koronára. Az erre használt eszközök a következők: CDS (*Coronal Diagnostic Spectrometer*), EIT (*Extreme Ultraviolet Imaging Telescope*), LASCO (*Large Angle and Spectrometric Coronagraph*), SUMER (*Solar Ultraviolet Measurements of Emitted Radiation*), SWAN (*Solar Wind Anisotropies*) és UVCS (*Ultraviolet Coronagraph Spectrometer*). A harmadik pedig a napszél és a hozzá kapcsolódó jelenségek helyi (*in situ*) mérése a Nap és Föld között elhelyezkedő L_1 pontban, melyhez a CELIAS (*Charge, Element, and Isotope Analysis System*) és COSTEP (*Comprehensive Suprathermal and Energetic Particle Analyser*) műszereit használja [17]. A SOHO által gyűjtött adatok alapján eddig közel 6 ezer tudományos publikáció született, amelyek közelebb vittek bizonyos kérdéseknek a megválaszolásához, vagy hozzájárultak ahhoz, hogy az új generációs napmegfigyelő űreszközök még pontosabban vizsgálhassák őket. Így felsorolni is nehéz – ha nem lehetetlen –, hogy milyen eredmények születtek, ezért a legfontosabbak közül kiemelünk néhányat. A SOHO segítségével bepillantást nyertünk a felszín alá, feltérképeztük csillagunk belsejének sűrűség- és hőmérséklet-eloszlását, kirajzolódott a felszín alatti rétegekben lévő plazma áramlása, a rétegek forgása. Megtudtuk, hogy a felszínen megfigyelhető differenciális rotáció – azaz, hogy az egyenlítői vidékek gyorsabban forognak, mint a pólusok környéke – nem korlátozódik csak oda, hanem a mélyebben fekvő rétegekre, a teljes konvektív zónára is ez a kép jellemző. Viszont a konvektív zóna alatt lévő rétegek, a sugárzási zóna és a mag is merev testként forog. A két forgási jellemzővel rendelkező régiót elválasztó réteg pedig a varakozások ellenére nem kiterjedt, hanem nagyon vékony (ez az úgynevezett tachoklína) [21]. A Nap lokális rezgéseinek vizsgálatával lehetőségünk adódott egy napfolt felszín alatti „részeiről” is képet alkotni [22]. Új, dinamikusan változó jelenségeket fedezett fel, mint például a koronahullámok és a naptornádók [23,24]. A napszél esetében megmérte a lassú és a gyors napszélkomponens gyorsulását, illetve azonosította a gyors napszél forrásterületeit, valamint a mögöttes gyorsítási mechanizmust. A gyors napszél forrásterületei a koronalyukak voltak, ahol a Nap mágneses erővonalai olyan messze záródnak a felszíntől, hogy ezen régiók mágnesesen „nyitott” tartományoknak tekinthetők [25]. Forradalmasította az űridőjárással kapcsolatos ismereteinket, és lehetővé tette a különböző űridőjárási események előrejelzését azáltal, hogy majdnem három nappal a Földre érkezés előtt észlelte azokat az aktív jelenségeket, amelyek geomágneses zavarokat okozhatnak. Ilyenek a Földre irányuló CME-k, amelyek több tonnányi töltött részecskét képesek a bolygóközi térbe juttatni, vagy a napkoronában és a napszélben megjelenő egyéb anomális változások. A koronaanyag-kidobódások vizsgálatára a SOHO LASCO koronográf műszere a legalkalmasabb, amellyel így 24–72 órával

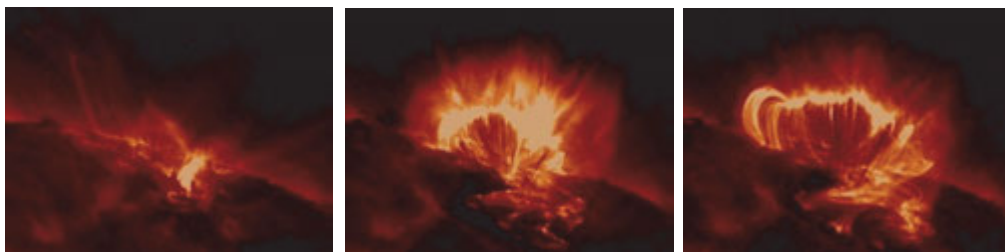
azelőtt jelezhető a napkitörés, hogy az elérné bolygónkat [26]. A LASCO amellett, hogy a Nap koronájában lejátszódó jelenségeket vizsgálja, egy nem várt területen is óriási sikert aratott. Mivel a LASCO kitakarja a napkorong fényét, egyfajta mesterséges napfogyatkozást létrehozva, a képeket elemző szakemberek eddig több mint négyezer üstököst fedeztek fel a segítségével (6. ábra). Így nemcsak a Nap kutatásban vannak elévülhetetlen érdemei, de a Naprendszer kutatásához is hozzájárult. A SOHO esetében fontosnak érezzük azt is kiemelni, hogy a küldetés első két éve után az obszervatóriummal gyűjtött adatok mind nyilvánosak és jelenleg is elérhetőek a SOHO honlapjáról.



6. ábra: A SOHO által felfedezett egyik üstökös, a 96P Machholz. Átlagosan hat évente kerüli meg a Napot, így a SOHO eddig háromszor figyelte meg a LASCO műszer segítségével. A képen emellett láthatjuk a Vénuszt, illetve egy koronaanyag-kidobódást, azaz CME-t is. (Forrás: NASA / ESA / SOHO)

Mint említettük, a SOHO-t eredetileg 1998-ig tervezték működtetni, így az 1998. április 2-án indított Transition Region and Coronal Explorer (TRACE) [27] űreszközt az utódjának is tekinthetnénk. Viszont

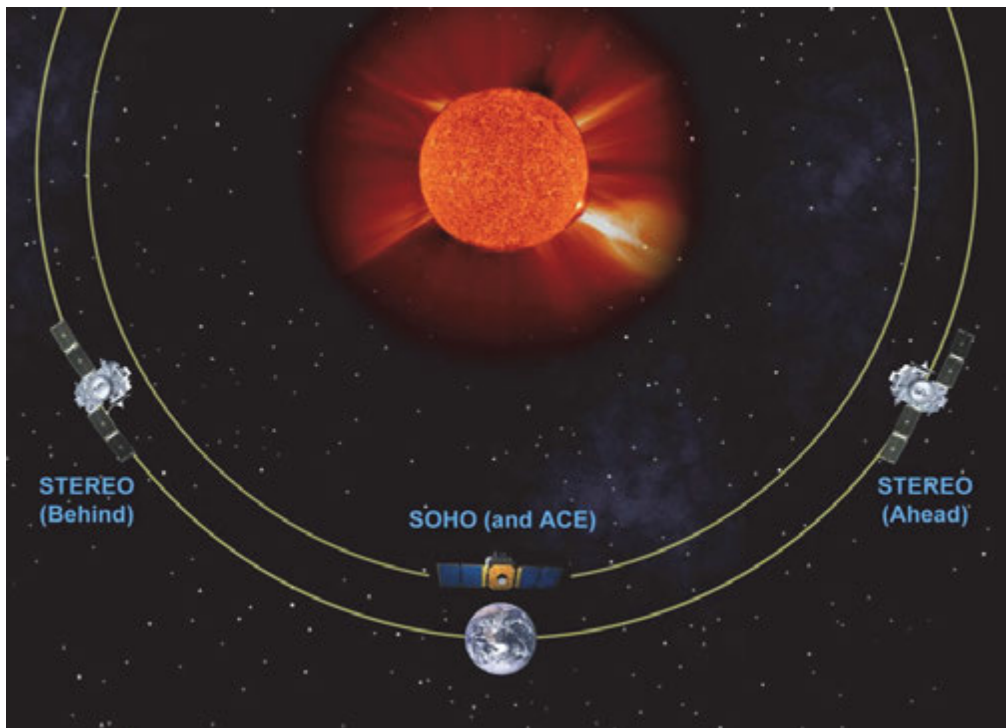
mivel a SOHO küldetését meghosszabbították, ezért a TRACE-t tulajdonképpen egy „kiterjesztett” SOHO műszerként üzemeltették, és a SOHO-val számos közös megfigyelési programban szerepelt. A TRACE a NASA/GSFC küldetése volt a Small Explorer (SMEX) programon belül. Tudományos célja a Nap felszínén megjelenő mágneses struktúrák, az úgynevezett „mágneses szőnyeg” hatásának vizsgálata a felső naplégkör – az átmeneti régió és a korona – geometriájára és dinamikájára. A TRACE egy 30 cm-es EUV képalkotó teleszkóppal rendelkezett, amely megduplázta a SOHO EIT teleszkópjának spektrális sávját. Térbeli felbontása 1 ívmásodperc, látómezeje $8,5 \times 8,5$ négyzetívmperc, míg időbeli felbontása 25 másodperc, de akár 10 másodpercenként is készíthetett képeket. A TRACE-t úgy tervezték, hogy kamatoztatva a Yohkoh és a SOHO által gyűjtött teljes napkorongos felvételeket, maximálisan kihasználja a kisebb látómezőt, de nagyobb térbeli felbontást, illetve a TRACE belső képstabilitása néhány század ívmásodperc, így hihetetlen részletgazdag és éles képeket tudott készíteni a naplégkör egyes régióiról. Mivel pályája 600 km magasan, a terminátor vonala mentén húzódott, így a SOHO-hoz hasonlóan 24 órában folyamatos napmegfigyelést tudott végezni, viszont csak az év 7 hónapjában. Földhöz közeli pályája miatt 2,5 Mbit/s sebességgel tudott adatokat továbbítani a norvégiai és az alaszakai állomásokra, viszont a tényleges adatátviteli sebesség ennél jóval kisebb volt (200 kbit/s), ugyanis az állomásokkal a 90 perces keringési periódus alatt 8 percig tudott kommunikálni.



7. ábra: A TRACE űrszonda 2002. április 21-én rögzítette egy röntgenkitörés (X-fler) különböző fázisait az AR9906 aktív régió felett. (Forrás: NASA Goddard Space Flight Center Scientific Visualization Studio)

Mivel a SOHO teljes napkorongról készült EUV felvételei és MDI magnetogramjai mindig rendelkezésre álltak, így a TRACE-t a tudományos szempontból érdekesebb régiókra lehetett irányítani (7. ábra). A nagy időbeli és térbeli felbontásnak köszönhetően a TRACE felfedte a folyamatosan fejlődő és változó kromoszféra, átmeneti réteg és korona struktúráit. Az aktív régiókhoz kapcsolódó koronahurkok, amelyek a kisebb felbontású SOHO felvételeken lassan változó struktúráknak tűntek, percek, vagy akár másodpercek (a TRACE időfelbontása szabott csak határt a megfigyeléseknek) alatt folyamatosan változnak, fejlődnek. Láthatóvá vált, hogy a hurkokba folyamatosan áramlik a plazma, amely így fűti is az alsóbb légrétegeket. Nem győzzük hangsúlyozni, hogy a nagy térbeli és időbeli felbontás feltárta a flerek, protuberanciák és filamentumok kisléptékű, de annál bámulatosabb dinamikáját [28]. Ezek a megfigyelések megerősítették azt a felismerést, hogy a kitörések egy komplex fizikai folyamat részei, amelyek nem minden esetben kapcsolódnak aktív régiókhoz. Az adatok egy mélyebb megértésre serkentették a kutatókat azzal kapcsolatban is, hogy hogyan halmozódhat fel a mágneses energia a koronában,

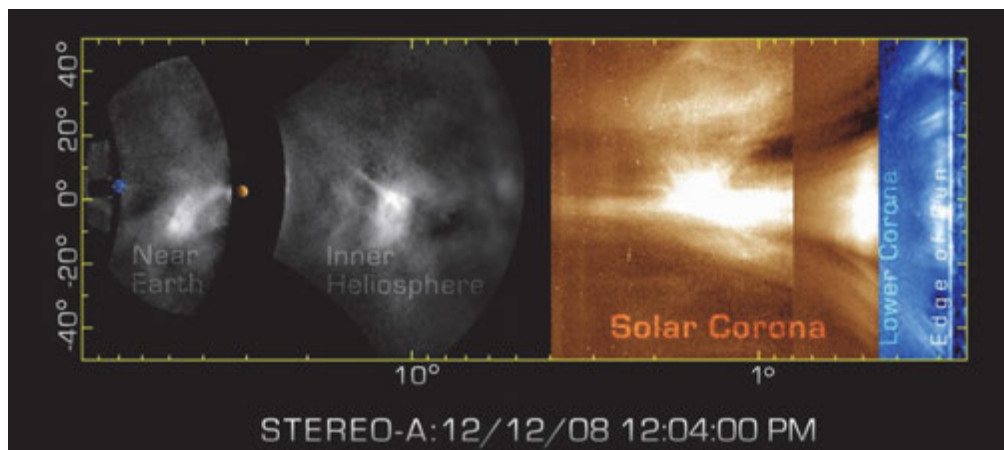
hogyan történik az energiefelszabadulás, és hogyan befolyásolja a felszabaduló energia a megfigyelt dinamikát. Újra felkeltette az érdeklődést a vektoros magnetogramok iránt, amelyek a mágneses topológiát mutatták meg, és az ezekkel kapcsolatos magnetohidrodinamikai (MHD) modellezések új szintre léptek. A TRACE megmutatta a napfizikai kutatótársadalomnak, hogy a nagy időbeli és térbeli felbontás kombinálása elengedhetetlen mind a nyugodt, mind az aktív Nap megértéséhez [28].



8. ábra: A STEREO űrszondák helyzete a napmegfigyelés során. (Forrás: NASA)

A felbontás növelésén túl a következő nagy lépést a tényleges háromdimenziós képalkotás, a sztereoszkópikus megjelenítés jelentette. A NASA 2006. október 26-án útjára indított küldetését, a STEREO-t így tervezték [29, 30]. Neve egyrészt egy mozaikszókból áll össze (*Solar TERrestrial RELations Observatory*), de emellett tükrözi azt is, hogy két szögből készíthet felvételeket a Napról (8. ábra). Ezért a küldetésre a NASA két ikerszondát küldött az űrbe, amelyek a Földhöz képesti űrbéli helyzetük alapján kapták nevüket: a STEREO-A, az angol *ahead* (elől) kifejezésből, míg a STEREO-B az előzőhöz hasonlóan az angol *behind* (hátsó) szóból. A két űrszonda a Földet megelőzve, illetve a bolygónkat követve kering a Nap körül, és ez az elrendezés teszi lehetővé a háromdimenziós képalkotást, amire korábban még soha nem volt példa. Mindkét szonda hasznos terhe két műszercsoportot tartalmaz: az egyik a *Sun-Earth Connection Coronal and Heliospheric Imager* (SECCHI), amely a Napról és környezetéről készít felvételeket, míg a másik az *In-Situ Measurements of Particles and CME Transients* (IMPACT), amely

az úgynevezett szoláris energetikus részecskék, azaz SEP-ek (*Solar Energetic Particles*) és a napszél elektronjainak háromdimenziós eloszlását vizsgálja, illetve a bolygóközi mágneses tér mérésére alkalmas műszer is egyben. A SECCHI öt kamerával rendelkezik, egy EUV képalkotóval, két fehér fényben felvételeket készítő koronográfval, illetve két további teleszkóppal, melyek a Nap és a Föld közötti térről készítenek felvételeket. A SECCHI legfontosabb tudományos célja a koronaanyag-kidobódások háromdimenziós evolúciójának tanulmányozása a Nap felszínétől a koronán és a bolygóközi téren keresztül egészen a Föld pályájáig (9. ábra). A két űrszondát egyszerre indították útnak, majd később, a Hold gravitációját kihasználva választották szét őket és így jutottak el a két különböző Nap körüli pályára.



9. ábra: A STEREO-nak és az új adatfeldolgozási technikáknak köszönhetően sikerült nyomon követni a 2008 végén bekövetkező űridőjárási eseményeket a Nap ultraforró koronájától egészen a Föld pályájáig. Az adatok begyűjtésének idején a STEREO-A közel 45 fokkal a Föld előtt volt a pályáján, így nagyon tiszta képet nyújtott a Föld-Nap vonalról. (Forrás: NASA / STEREO)

Fokozatosan távolodtak el egymástól, majd 2011 elején érték el az egymáshoz képesti 180 fokok szög-távolságot. Ez történelmi pillanatnak bizonyult, ugyanis elkészítették az első felvételeket 3D-ben Napunkról. Ráadásul az elmúlt 150 év legintenzívebb napkitörése – amely 2012. július 23-án következett be – már nem tudott elbújni az ikerszondák szeme elől [31,32]. Szerencsére a Napból kidobott plazma nem a Földet, hanem az éppen ilyen jeleségek mérésére szolgáló STEREO-A űrszondát találta el, ennek köszönhetően viszont rendkívül részletes elemzéseket lehetett végezni. A rendkívül nagy sebességgel száguldó plazmafelhők a 0,96 csillagászati egység távolságot mintegy 19 óra alatt tették meg, vagyis óránként csaknem 10 millió kilométert haladtak (ez a fénysebesség közel 1%-a). Az adatok kiértékelése szerint 2012. július 23-án 10–15 perc időkülönbséggel két koronaanyag-kidobódás elhagyta a Nap felszínét. Ráadásul a két CME egy olyan plazmacsatornában haladt az interplanetáris térben, amelyet négy nappal korábban egy másik CME tisztára söpört, így a későbbi CME-k plazmafelhői kevésbé lassultak kozmikus utazásuk közben.

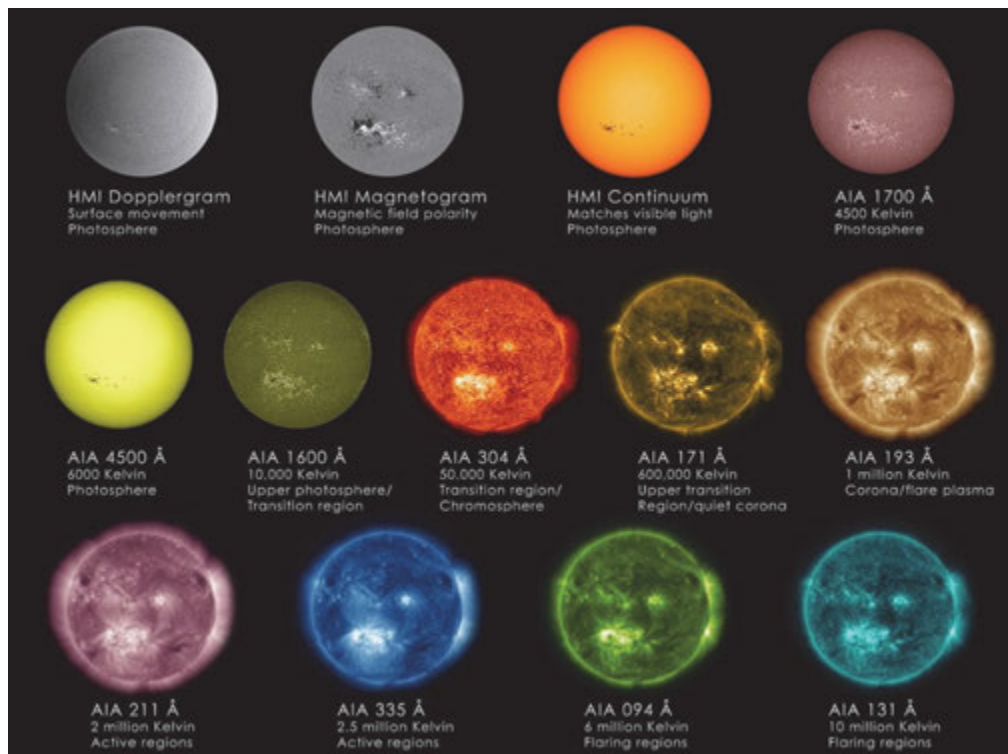
2014 júniusában mindkét űreszköz antennája esetében váratlanul magas hőmérsékletet érzekelt, ami jelentősen csökkentette az adatkommunikáció sebességét. Ez a tudományos programok megvalósíthatóságának csökkentésével is járt, így 2014 augusztusában egy visszafogottabb tudományos programot dolgoztak ki a tudósok. Egy 2014. szeptember 3-án bekövetkező hatalmas protonvihar – amelyet a Nap túlsó oldalán bekövetkezett napkitörés okozott – tovább csökkentette a program megvalósíthatóságának esélyeit. Az energetizált részecskék fluxusa olyan nagy volt, hogy mindkét STEREO szondán alaphelyzetbe állt a navigációhoz szükséges csillagkövetés. Később, október 1-jén, a STEREO-B-vel megszakadt a kommunikáció, közvetlenül az űrszonda tervezett újraindítása után. Sajnos a kitartó próbálkozások ellenére sem sikerült újra kapcsolatba lépni vele – ennek lehetséges okaként a napelemek Naptól való elfordulását jelölték meg, hasonlóan a korábbi űreszközhöz, a SOHO-hoz. A SOHO a szerencsének is köszönhetően – a napelemtáblák újra a Nap felé fordultak – folytatta méréseit, ezért a STEREO-B esetében is csak várni és reménykedni tudtak. A kezdeti sűrűbb próbálkozásokat idővel felváltotta a havi egy kísérlet a STEREO-B-vel való kapcsolat visszaállítására, ami végül 2016 augusztusában sikerre vezetett. Viszont sajnos korai volt az öröm, ugyanis az űrszonda irányíthatatlannal forgott a fő tehetetlenségi tengelye körül, és csak ezen forgás következtében jutott néha csekély mennyiségű napenergiához. Ez végül nem bizonyult elégnek a javítás megvalósítására. Így a hosszan tartó próbálkozások ellenére is a mérnököknek be kellett látniuk, hogy a STEREO-B nem használható a továbbiakban tudományos célokra. Ráadásul 2015 márciusában a STEREO-A is néhány hónapig biztonsági üzemmódba kapcsol, ugyanis a Föld áttelleges oldalára került, így a napelemek nem kaptak elég fényt a szükséges energia előállításához.

Az évek során fellépő nehézségek ellenére a STEREO küldetés mindenképp az űrtörténelem fontos és megemlítenő példái közé tartozik, amit az általa szolgáltatott eredmények is alátámasztanak. Segítségével kaptunk bizonyosságot a CME-k topológiájára vonatkozóan. Eszerint ezek a képződmények megfelelnek a felszíntől elszakadó mágneses fluxuskötegeknek, amelyek a modellszámítások alapján várt alakot mutatják, és csak a különböző rálátási szögek eredményezhetnek más-más struktúrát [33]. Az oldalnézetből való mérés nagy előrelépést jelentett a CME érkezési idejének pontosabb számolásában, illetve az egyedi elrendezésüknek köszönhetően a CME terjedési irányát is könnyebb meghatározni. Az in situ mérések lehetővé tették a SEP-ek különböző tulajdonságainak – mint például az energiájuk, az összetételük és az eloszlásuk – egyedi vizsgálatát, ami alapján további megállapításokat tehetünk a SEP-ek gyorsulása mögött álló fizikai folyamatokról és az interplanetáris térben való terjedésükről. Megannyi korábbi eredményt felsorakoztatva, és annak ellenére, hogy már csak az egyik űrszonda működőképes, a jövőben is bizakodva várjuk az újabb mérföldköveket a STEREO-A-tól [34].

Ebben a tanulmányban utolsóként a SOHO utódjaként is emlegetett, 2010. február 11-én indított Solar Dynamics Observatory (SDO) napmegfigyelő műholdról szeretnénk még említést tenni. Az SDO a NASA LWS (*Living With a Star*) programjának első küldetése, amely egy űridőjárás- és alkalmazásorientált kutatási program. Az LWS célja, hogy megértse a Napot, mintha egy mágneses változócsillag lenne, és mérje a földi életre és társadalomra gyakorolt hatását. Tanulmányozza a Földet és az emberiséget érintő naptevékenység és változékonyság mozgatórugóit. Az SDO küldetése a napselső dinamikájának

megfigyelése, a Nap mágneses terének feltérképezése, a Napból a bolygóközi térbe történő tömeg- és energiafelszabadulás jellemzése, valamint a napsugárzás változásainak nyomon követése. A végső cél a Nap dinamikus állapotának – változékonyságának – megértése különböző időbeli és térbeli skálákon: ezen változások hogyan befolyásolják a földi életet és technológiát, hogy végül lehetővé váljon az űridőjárás-előrejelzés operatív képességének kifejlesztése.

Az SDO egy ferde geoszinkron pályán kering, amely a Nap szinte folyamatos megfigyelését teszi lehetővé. Ez utóbbit más pályákról, például alacsony Föld körüli pályáról (*low-Earth orbit*, LEO) is el lehetne végezni, viszont ez esetben nagy mennyiségű adat tárolását kellene biztosítani, amíg a műhold egy vevőállomás felett el nem halad. Az, hogy az SDO esetében nagy adatátviteli sebességre van szükség, illetve a nagy fedélzeti adattároló rendszer kezelésének nehézségei a folyamatos kapcsolat követelményét eredményezték. Az SDO pályájának hátrányai közé tartozik a magasabb indítási és pályára állási költség, valamint hogy évente kétszer földárnyékba kerül a műhold. Ezekben a 2-3 hetes „napfogyatkozási” időszakokban az SDO nem tudja észlelni a Napot. Végül az SDO folyamatosan 130 Mbit/s adatátviteli sebességgel továbbítja a jeleket az új-mexikói White Sands-ben található két földi állomásnak. A műhold adatátviteli sebessége több mint két nagyságrenddel na-



10. ábra: Az SDO HMI és AIA műszereivel készített felvételek a Napról. Jól látható, hogy milyen hullámhosszakon készültek a felvételek, illetve hogy azok milyen hőmérsékleti tartománynak felelnek meg. (Forrás: NASA / SDO)

gyobb, mint bármely korábbi napmegfigyelő űreszközé. Egy nap alatt annyi adatot szolgáltat, mint a TRACE öt év alatt.

Az SDO három fő tudományos műszerrel rendelkezik: az *Atmospheric Imaging Assembly* (AIA), a *Helioseismic and Magnetic Imager* (HMI) és az *Extreme Ultraviolet Variability Experiment* (EVE). Ezek együttesen működve készítenek – akár a teljes napfelszínről – 6000 K-tól egészen 20 MK-es hőmérsékleti tartományig felvételeket (10. ábra), nagyfelbontású dopplerogramokat, látóirányú és vektor magnetogramokat, valamint mérik a szoláris sugárzásban bekövetkező változásokat az EUV és röntgentartományokban [35]. Hasonlóan a korábbi nagy elődhöz, a SOHO-hoz, az SDO esetében is több ezernél tart már a tudományos publikációk száma, így itt is csak kiragadunk párat az eredmények közül. Az SDO számtalan napkitörést rögzített döbbenetes részletességgel. Az első másfél évben a műhold közel 200 flert észlelt, ami lehetővé tette a kutatók számára egy új mintázat felismerését. Nevezetesen, hogy a flerek körülbelül 15%-ánál van egy „késői fázisú fellángolás”, amely percekkel vagy akár órákkal később követi az első kitörést [36]. 2012 februárjában az SDO olyan felvételeket készített a napfelszínről, amelyeken hatalmas plazmatornádók voltak láthatóak. A későbbi megfigyelések alapján ezek a naptornádók – amelyeket a plazmát forgató mágneses mezők hoznak létre – akár 300000 km/h sebességgel is foroghatnak (a földi tornádók csak 450 km/h-t érnek el) [37]. A napfelszínen kavargó „plazmatenger” olyan óriási hullámokat hoz létre, amelyek akár közel 5 millió km/h sebességgel járnak körbe a Napot. Az SDO 2010-ben készített méréseket ezekről a hullámokról, amelyeket EIT-hullámoknak neveztek el az SDO azonos nevű műszere után, amelynek a felfedezése is köszönhető volt. A tudósok azt gyanítják, hogy ezeket a hullámokat a koronaanyag-kibőbódások hajtják. A helioszeizmikus mérések óta tudjuk, hogy Napunk belsejében a nagyléptékű áramlás milyen jellegű (lásd korábban a SOHO eredményeinek leírásakor), viszont a gyengébb áramlások esetében eddig a napfoltok mozgásának vizsgálatából csak a felszínen tudtuk kimérni az úgynevezett meridionális cirkulációt (sebességének nagysága a felszínen kb. 20 m/s). Ez az áramlás az egyenlítőre merőleges síkban jön létre, és a felszínen az egyenlítőtől a pólus felé áramlik a plazma, amely a mélyben valahol vissza kell forduljon. Az SDO megfigyelései feltárták, hogy ez a cirkuláció sokkal összetettebb, mint azt korábban gondolták, és mivel kulcsszerepet játszik a napdinamó működésében és a vele szorosan összefüggő napfoltok kialakulásában, ezért fontos ismernünk jellegzetességeit.

A már több mint egy évtizedes működése során az SDO megfigyelései lassan lefednek egy teljes napciklust. A 24. napciklus kezdete óta figyeli a Napot, látta, ahogy az aktivitás eléri csúcspontját, majd lassan csökken, hogy újra emelkedni kezdjen. Ezek a több éves megfigyelések segítenek felfedezni és megérteni azokat a jeleket, melyek az egyik napciklus hanyatlását és a következő kezdetét jelzik. Ehhez járult hozzá az is, hogy az SDO által megfigyelt koronalyukak segítségével a kutatók meghatározták, hogy mikor fordul át a Nap mágneses tere, ami az egyik legfontosabb mutatója a napaktivitás maximumának. 2019 decemberében az SDO megfigyelések lehetővé tették egy új típusú mágneses „robbanás” felfedezését. Ez a speciális típus, amelyet spontán mágneses rekonnexiónak – szemben a korábban megfigyelt általánosabb mágneses rekonnexióval – neveznek, segíthet megerősíteni egy több évtizedes elméletet, hozzájárulva a felsőbb légköri rétegek, a korona több millió fokal hőmérsékletét kialakító folyamatok megértéséhez.

Honnan hová jutottunk és merre tartunk?



11. ábra: A napkutatásokat támogató űreszközök. (Forrás: NASA)

Az előzőekben láthattuk, hogy mekkora sikereket értünk el a napfizikai kutatások területén az űr megfigyeléseknek köszönhetően. Nem győzzük hangsúlyozni, hogy itt csak kiragadott példákat mutattunk be. Számos nagyszerű műszer volt még, amelyek alapjaiban járultak hozzá a Napról alkotott fizikai modellünk kiteljesedéséhez, vagy a Nap bolygóközi térre gyakorolt hatásának vizsgálatához (11. ábra). Hogy még jobban megértsük és lássuk ezen műszerek fontosságát, érdemes megnéznünk, hogyan változtak a kérdések és a fókuszok a napfizika területén. Először egy a 19. század végén megjelent könyvből, C.A. Young *The Sun* címen 1892-ben írt monográfiájából indulunk ki, ahol bepillantást nyerhetünk abba, hogy mit gondoltak fontosnak a múltban. Így némi perspektívát kaphatunk az akkor kritikus kérdésekről: először is kielégítő magyarázatot kerestek a Nap felszínén megfigyelt sajátos forgási törvényre, a differenciális rotációra; másodsor meg akarták ismerni a foltok eloszlásának és periódicitásának az okát; harmadszor szerették volna meghatározni a napsugárzás mennyiségének időbeli változását; végül negyedszer kapcsolatot kerestek a fotoszféra felett megfigyelt gázok és anyagok (korona, protuberanciák), valamint a felszín megfigyelt sajátosságai között. Ezek a kritikus kérdések a 20. század közepén, az akkor ugyan még gyerekcipőben járó, de annál érdekesebb felfedezéseket tevő űreszközöknek köszönhetően kicsit megváltoztak, a prioritások áthelyeződtek. A NASA felkérte a Nemzeti Tudományos Akadémia Űrkutatási Testületét (*Space Studies Board of the National Academy of Sciences*), hogy rendezzenek egy workshopot, ahol megfogalmazzák azokat a legfontosabb feladatokat és kérdéseket, amelyekre az űrben végzett újabb megfigyelések során választ szeretnénk kapni (National Research Council, 1966). Az ott megfogalmazott kérdések nagyon röviden a következők voltak:

- **Evolúció és belső szerkezet:** hogyan alakult/alakultak ki a Nap és a hozzá hasonló csillagok, és milyen fejlődési állapotokon mennek keresztül? Milyen folyamatok során szállítódik a Nap magjában termelt energia a külsőbb tartományok felé? Milyen a Nap pontos kémiai összetétele és fizikai állapota, milyen eloszlásokat követnek az állapotjelzők? Mi az eredete a Nap mágneses mezejének és a napciklusnak?
- **Fotoszféra:** milyen fizikai feltételek uralkodnak a fotoszférában? Mi az eredete az ott megfigyelt turbulencia spektrumának?
- **Kromoszféra és korona:** milyen a felső naplégkör szerkezete? Hogyan lehet és kell figyelembe venni a magassággal együtt járó hőmérséklet-emelkedést, amely egészen a koronáig folytatódik? Milyen a külső korona formája? Hogyan kapcsolódik a bolygóközi térhez?
- **Naptevékenység:** honnan származik és milyen energiák hajtják a napfelszínen megjelenő különböző alakzatokat, látványos jelenségeket, mint például napfoltok, flarek, rádiókitörések stb.?

Mint említettük és nyilvánvaló is, hogy a 19. század végén és a 20. század közepén kritikusnak tekintett kérdések között markáns hasonlóság van, de vannak jelentős különbségek is. A csillagfejlődés, az elemek keletkezéséért felelős nukleáris folyamatok és reakciók a kísérleti és elméleti magfizika miatt is fontossá váltak. Emellett a kémiai elemek keletkezéséhez szükséges feltételek megértése és összekapcsolása a csillagok fejlődésével felkeltette a reményt, hogy a Nap a magfizikával párosulva Rosetta-kő lehet a csillagok természetével és eredetével kapcsolatos jövőbeli felfedezések számára. A 19. század második felében a napfelszínről készült felvételek olyan mintát mutattak, amely a sejtekéhez volt hasonló. Azonban a Nap magas hőmérséklete és alacsony viszkozitása a konvekció jelenlétét összeegyeztethetlenné tette a hagyományos hidrodinamikai elméletekkel. Az elméleti szakemberek közül sokan azt állították, hogy a megjelenő sejtes szerkezet a földi légkör zavaró hatásának eredménye.

E pár példa alapján is látjuk, hogy az elméletek és a megfigyelési módszerek fejlődése hogyan vezetett a kérdések újabb és újabb csoportjához. A 20. század közepén megfogalmazott, kihívást jelentő feladatok valójában a kérdések fészkeinek tekinthetők. Az „Evolúció és belső szerkezet” feladatköre nagy előrelépést ért el, köszönhetően annak, hogy sikerült a magreakciókat és a lejátszódásukhoz szükséges feltételeket megismerni, valamint a kémiai elemek előállításához szükséges környezetet létrehozó csillagászati eseményeket felderíteni. Az asztroszeizmológia, a Kepler- és a Gaia küldetés, valamint az asztrofizika fejlődése révén körvonalazódott a Naphoz hasonló hűvös csillagok keletkezése és fejlődése. A helioszeizmológia a numerikus szimulációkkal párosulva megmutatta, hogy a pólus és az egyenlítő közötti kis hőmérséklet-különbség is elegendő a napbelsőben és a felszínen megfigyelhető áramlás kialakításához és fenntartásához. A fotoszféra turbulens áramlásai a megfigyelések és a modellezések ötvözésének köszönhetően már különböző méretskálákon is igazolást nyertek. A felszín feletti rétegekről készült megfigyelések egy összetett képet mutattak meg a kromoszféráról és az átmeneti régióról, valamint feltárták az őket alkotó struktúrákat. A nagyfelbontású spektrumok és a numerikus modellek együttesen segítettek részleteket feltárni a kromoszféra egyes struktúráinak fűtési mechanizmusáról, illetve arról, milyen folyamatokon keresztül történik a korona alsóbb rétegeiből történő fűtése. A napkorona alakját és mágneses

terét olyan modellekkel próbálják leírni, amelyek szerint a korona mágneses tere egy potenciális térrel közelíthető, peremfeltételként a teljes Nap látóirányú mágneses terének méréseit használják, és feltételezik, hogy a mágneses tér a Naptól 2,5 napsugár távolságban már radiális irányú. Ezek a számítások azonban nem ragadják meg a korona dinamikáját a felszínen kialakuló aktív régiók felett, sem a kitöréseket, sem a filamentumok gerjesztődését, sem a CME-kben megfigyelhető változásokat. Sajnos minden mágneses-ter-extrapoláció a teljes napfelszínre kiterjedő mágneses mező ismeretétől függ, amelyet nem lehet egyetlen nézőpontból megszerezni.

Emellett szükség van még a mélyebb rétegekben lejátszódó dinamóhatás ismeretére is, amelynek pontos mechanizmusa a mai napig a napfizika nagy megoldatlan problémái közé tartozik. A dinamó- és MHD modellek sok, a naptevékenység időszakában megfigyelhető jellemzőt képesek már reprodukálni, de egyelőre nem tudják a mért mágneses tér és a felszíni áramlások megfigyelései alapján megbízhatóan megjósolni ezeket a változásokat, előre jelezni a kitöréseket. Lenyűgöző szimulációk vannak a napfoltokat létrehozó mágneses fluxuscsővek időbeli fejlődéséről, azonban még ma is kérdés, hogy pontosan honnan és hogyan kerülnek a felszíni rétegek alá.

A megválaszolandó kérdések és megoldandó feladatok listájában szerencsére vannak kipipálható tételek, de sok feladat esetében, amikor egyre mélyebbre ásunk a megértés bizonyosságát keresve, újabb és újabb kérdéseket találunk. Ahogy műszereink egyre nagyobb felbontásban, egyre részletesebb képet alkotnak, ugyanazt a jelenséget különböző aspektusból megőrkítve, olyan alkotóelemekre találhatunk – legyenek azok a fizikai valóságban vagy jelenjenek meg a modelljeinkben –, amelyekre korábban nem számítottunk. Jelenleg is több űreszköz van, amelyek folyamatosan figyelik a Napot, mérik a Nap környezetében bekövetkező változásokat. Ezekről már a terjedelem miatt nem írunk részletesen, hiszen az egyes szondák tudományos céljai és a már most elért eredmények is külön-külön tanulmányt érdemelnének. Ilyen például a NASA 2018. augusztus 12-én útnak indított Parker Solar Probe (PSP) küldetése, amelynek célja a *touch the Sun* (érintsd meg a Napot) volt. Ez volt az első űrszonda, amely 2021-ben átrepült a korona külső régióin, példátlan megfigyeléseket szolgáltatva. A hét évig tartó küldetése alatt huszonnégyszer kerüli meg a Napot, és annak köszönhetően, hogy műszereit egy 11,5 cm-es szén-kompozit pajzs védi a Naptól, amely közel 1400 fokig képes ellenállni az extrém hőmérsékleti viszonyoknak, képes közvetlenül tanulmányozni a napkoronát. Szintén nagy reményeket fűzünk az ESA/NASA együttműködés keretében 2020. február 10-én indított Solar Orbiter küldetéshez is. Tudományos tevékenysége 2021 novemberében kezdődött, legfontosabb eleme pedig, hogy a Nap poláris régióit tanulmányozza.

Záró gondolatként talán az a legjobb, ha felsoroljuk azokat a tudományos kérdéseket, amelyek a 21. század elején a Nappal és környezetével foglalkozó tudósokat a leginkább foglalkoztatják:

- Milyen mechanizmusok irányítják a naptevékenység kváziperiodikus, 11 éves ciklusát?
- Hogyan szintetizálódik, koncentrálódik és oszlik el az aktív régiók mágneses fluxusa a napfelszínen?
- Hogyan alakítja át a kis léptékű mágneses rekonnexió a nagy léptékű tértopológiát és az áramrendszereket, és mennyire van jelentősége a korona fűtésében és a napszél felgyorsításában?

- Hol és hogyan keletkeznek a Nap EUV spektrumában megfigyelt változások, és hogyan kapcsolódnak ezek a mágneses aktivitási ciklusokhoz?
- Milyen mágneses térkonfigurációk vezetnek a koronaanyag-kidobódásokhoz, az eruptív protuberanciákhoz és a flerekhez, amelyek során energetizált részecskék, SEP-ek és sugárzás is keletkezik?
- Mi hajtja a napszelet és hogyan lehet rekonstruálni a korona mágneses térszerkezetét?
- Hogyan függ a napaktivitástól a bolygóközi mágneses tér változékonysága?
- Lehetséges-e pontos és megbízható előrejelzéseket készíteni az űridőjárásról? (12. ábra)



12. ábra: Művészi illusztráció az űridőjárásról és lehetséges hatásairól. (Forrás: Johns Hopkins Applied Physics Laboratory)

Irodalomjegyzék

- [1] Hale G.E. (1931): *The Spectroheliograph and its Work. Part III. Solar Eruptions and Their Apparent Terrestrial Effects.* *Astrophysical Journal*, 73, 379
- [2] Newton H.W. (1936): *Eruptive dark flocculi and their possible relation to magnetic disturbances.* *The Observatory*, 59, 51
- [3] Parker E.N. (1958): *Dynamics of the Interplanetary Gas and Magnetic Fields.* *Astrophysical Journal*, 128, 664

- [4] Harvey B. (2007): *Russian Planetary Exploration: History, Development, Legacy, Prospects*. Springer, Praxis (Chichester, UK)
- [5] Neugebauer M., Snyder C.W. (1966): *Mariner 2 Observations of the Solar Wind, 1. Average Properties*. *Journal of Geophysical Research*, 71, 4469
- [6] Neugebauer M., Snyder C.W. (1966): *Mariner 2 Observations of the Solar Wind, 2. Relation of Plasma Properties to the Magnetic Field*. *Journal of Geophysical Research*, 72, 1823
- [7] Muller C. (2014): *The Carrington solar flares of 1859: consequences on life. Origins of Life and Evolution of Biospheres*, 44, 185
- [8] NASA's Explorer Program Satellites. NASA GSFC, <https://nssdc.gsfc.nasa.gov/multi/explorer.html>
- [9] Corliss W.R. (1971): *NASA Sounding Rockets, 1958-1968: A Historical Summary*. NASA Historical Report Series, SP-4401 (Washington, D.C., USA)
- [10] Orbiting Solar Observatory: OSO I. (1965), NASA SP-57 (Washington, D.C., USA)
- [11] Kraushaar W.L. et al. (1972): *High-Energy Cosmic Gamma-Ray Observations from the OSO-3 Satellite*. *Astrophysical Journal*, 177, 341
- [12] Hudson H.S. et al. (1969): *The Hard Solar X-Ray Spectrum Observed from the Third Orbiting Solar Observatory*. *Astrophysical Journal*, 157, 389
- [13] Koutchmy S. (1988): *Space-borne coronagraphy*. *Space Science Reviews*, 47, 95
- [14] Pelling M.R. (1973): *Long-Term X-Ray Observations of Scorpius X-1 by OSO-III*. *Astrophysical Journal*, 185, 327
- [15] Compton W.D., Benson C.D. (1983): *Living and working in space. A history of Skylab*, NASA History Series, SP-4208 (Washington, D.C., USA)
- [16] Gurman J.B. (1987): *NASA's Solar Maximum Mission: a look at a new Sun*. NASA-TM-89539, NASA GSFC (Greenbelt, MD, USA)
- [17] Domingo V., Fleck B., Poland A.I. (1995): *The SOHO Mission: an Overview*. *Solar Physics*, 162, 1
- [18] Olive J.-P., Chaloupy M., Schweitzer H. (2002): *The SOHO spacecraft: a solar cycle mission*. SOLMAG 2002, Proc. Magnetic Coupling of the Solar Atmosphere Euroconference, ESA SP-505 (Noordwijk, Hollandia), 41
- [19] Vandenbussche F.C. (1999): *SOHO's recovery – An Unprecedented Success Story*. *ESA Bulletin*, 97, 39
- [20] Hellemans A. (1999): *SOHO Learns the Cruder Arts of Navigation*. *Science*, 283, 917
- [21] Kosovichev A.G. et al. (1997): *Structure and Rotation of the Solar Interior: Initial Results from the MDI Medium-L Program*. *Solar Physics*, 170, 43
- [22] Zhao J., Kosovichev A.G., Duvall T.L. (2001): *Investigation of Mass Flows beneath a Sunspot by Time-Distance Helioseismology*. *Astrophysical Journal*, 557, 384
- [23] Moses D. et al. (1997): *EIT Observations of the Extreme Ultraviolet Sun*. *Solar Physics*, 175, 571
- [24] Pike C., Mason H. (1998): *Rotating Transition Region Features Observed with the SOHO Coronal Diagnostic Spectrometer*. *Solar Physics*, 182, 333
- [25] Baldwin E., Fleck B., Müller D. (2015): *Two decades of observing the Sun*. *ESA Bulletin* 163, 16
- [26] Fleck B. et al. (2006): *10 years of SOHO*, *ESA Bulletin*, 126, 25
- [27] Handy B.N. et al. (1999): *The transition region and coronal explorer*. *Solar Physics*, 187, 229
- [28] Hudson H.S. et al. (2006): *White-Light Flares: A TRACE/RHESSI Overview*. *Solar Physics*, 234, 79

- [29] Driesman A., Hynes S., Cancro G. (2007): *The STEREO Observatory*. *Space Science Reviews*, 136, 17
- [30] Kaiser M.L. et al. (2007): *The STEREO Mission: An Introduction*. *Space Science Reviews*, 136, 5
- [31] Dryer M. et al. (2012): *Extreme Fast Coronal Mass Ejection on 23 July 2012*. *American Geophysical Union, Fall Meeting 2012*, abstract SH44B-04
- [32] Freed A.J. et al. (2013): *The Solar Event of July 23, 2012: Historical Context, Unusual Behavior, Streaming Limit and Wave Particle Instabilities*. *American Geophysical Union, Fall Meeting 2013*, abstract SH31B-2023
- [33] Newmark J.S. et al. (2007): *The SECCHI experiment on STEREO*. *Solar Physics and Space Weather Instrumentation II*, szerk. Fineschi S., Viereck R.A. *Proceedings of the SPIE*, 6689, 668902
- [34] Ossing D.A. et al. (2018): *Journey , Round the Sun: STEREO Science and Spacecraft Performance Results*. *IEEE Aerospace Conference*, 20190001502
- [35] Pesnell W.D., Thompson B.J., Chamberlin P.C. (2012): *The Solar Dynamics Observatory (SDO)*. *Solar Physics*, 275, 3
- [36] Woods T.N. et al. (2012): *Extreme Ultraviolet Variability Experiment (EVE) on the Solar Dynamics Observatory (SDO): Overview of Science Objectives, Instrument Design, Data Products, and Model Developments*. *Solar Physics*, 275, 115
- [37] *Solar Tornadoes as Seen by SDO*. NASA/Goddard Space Flight Center Scientific Visualization Studio, <https://svs.gsfc.nasa.gov/3919>

Műszertechnikai fejezetek a mérnöki bolygótudományból

Kereszturi Ákos

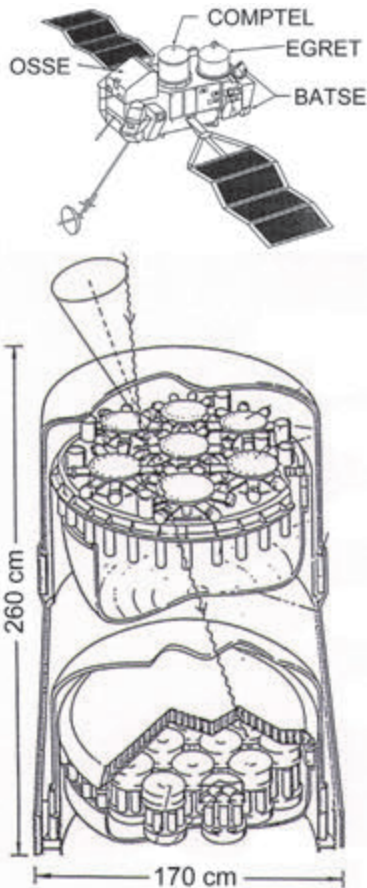
A Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem (BME) űrtudomány iránt érdeklődő hallgatói 2023-ban a bolygó kutatás műszaki vonatkozásairól is hallhattak az egyetemi oktatásban, ahol planetológiai és csillagászati ismereteket nyújtó műszereket és űreszközöket mutatott be Kereszturi Ákos Bacsárdi László az Űrkutatás és űrtechnológia című kurzusa keretében [1]. Olyan mérnöki problémákkal és feladatokkal ismerkedtek a diákok, amelyek technológiai szempontból „csúcsteljesítményt” képviselnek, és még nem kerültek át hétköznapi alkalmazásokba, hanem egyedí megoldások egy-egy űrszondára fejlesztve. Az alábbiakban a bemutatott témakörökből szemezgetünk, a teljesség igénye nélkül, a spektrum széles palettájáról válogatva, lefedve a Földön kívüli élet lehetőségének és a bolygótesetek jellemzőinek a kutatását.

HUN-REN
Csillagászati és
Földtudományi
Kutatóközpont,
Konkoly Thege Miklós
Csillagászati Intézet,
Budapest

A csillagközi anyag és a születő bolygórendszerek kémiai fejlődése szempontjából fontos az alumínium 26-os tömegszámú izotópjának gyakorisága. Csillagközi előfordulásának feltérképezése gamma-sugárzás alapú mérésekkel történik. Az **²⁶Al izotóp eloszlása** aktív környezetre utal, a kérdéses térségben születő bolygócsíráknál korai hőforrásként jeget olvaszthatott, és közreműködött a vizes kémiai átalakulásokban, valamint az ún. szeprentinizáció keretében exoterm kémiai reakciók fellépésében, tovább melegítve a kérdéses égitestek belsejét [2]. Mindez az égitestek kémiai fejlődését befolyásolja, valamint a bolygócsírák széttörése és meteoritként történő lehullása nyomán a többi égitest felszíni kémiai viszonyaira is hatással lehet.

A Compton Gamma Ray Observatory (CGRO) műholdon elhelyezett COMPTEL teleszkóp (1. ábra) végzett ilyen gamma-méréseket, ahol a két detektor közül a „feljebb lévőben” Compton-szórás (nagyenergiájú foton rugalmatlan szóródása, ami elektront is kelt) történik. Itt egy NE 213A jelű folyadék szcintillátorban a beérkező gamma-sugárzás az eredeti érkezési irányát csak részben megtartva szóródik, majd a második detektort elérve, annak nátrium-jodid kristályaiban kisebb energiájú fotonokat és elektronokat kelt – utóbbiak már egyszerűbben mérhetők. Az eljárás a beérkezett gamma-sugár energia- és iránybecslését teszi lehetővé, amiből további számításokkal az ²⁶Al izotóp csillagközi eloszlása is térképezhető.

A megszületett bolygók észlelése nem könnyű, mivel többnyire sűrű csillagközi felhőkben jönnek létre. Megpillantásukra az infravörös tartományban nyílik lehetőség, az ebbe a hullámsávba eső sugárzás ugyanis áthatol a kérdéses csillagközi felhőkön. Ugyanakkor sajnos ezek a hullámhosszak szinte alig tanulmányozhatók a földfelszínről a légkör (elsősorban a vízgőz) elnyelő hatása miatt, ezért az űrbe kell infravörös távcsöveket felbocsátani.

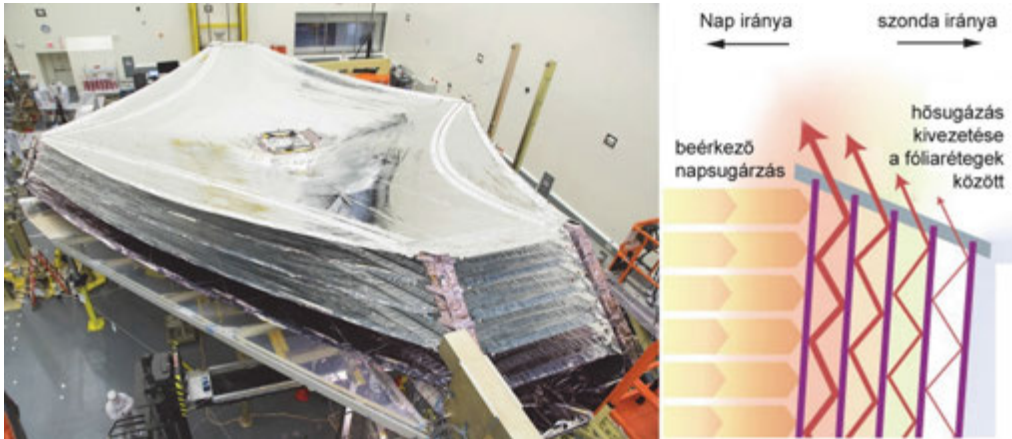


1. ábra: A CGRO műhold fő műszerei (fent) és a COMPTEL gamma-távcső szerkezete (lent). (Forrás: NASA)

Napjaink egyik ilyen csúcsműszere a **James Webb-űrtávcső**, amelynek detektorát erősen hűteni is kell a pontos, zajmentes mérésekhez. Az űreszközben az infravörös jelek érzékelésére egy HgCdTe detektor szolgál, amelynek ideális üzemi hőmérséklete mindössze 37 K, továbbá a kapcsolódó áramkört is hűteni kell az adatrögzítésig. Ahhoz, hogy minél könnyebb legyen ezen berendezések aktív hűtése, magát az egész műszeregységet is minél jobban árnyékolni kell a napsugárzástól. Erre 0,2–0,5 mm közötti vastagságú napárnyékoló, Al-Si borítású, ún. kapton anyagú poliimid hőszigetelő fólia öt egymás mögötti rétegével kerül sor (2. ábra). A fóliarendszer a Nap által megvilágított külső rétegének 283 K hőmérsékletéről befelé az ötödik rétegnél 39 K-re csökkenti a hőmérsékletet. Komoly technikai kihívás volt, hogy a teniszpálya méretű, ötrétegű fóliát összehajtogatott állapotban kellett tárolni, majd a szonda üzemelési helyére érkezve kinyitni. Ezen a passzív hűtésen túl ún. aktív hűtés is kell a detektor és elektronikája közvetlen közelében. Az itt alkalmazott kriogén technológia folyékony He segítségével akár 6 K-ig is le tudja hűteni a rendszert. További technikai nehézséget jelent, hogy „vibrációmentes” pumpákat kellett beépíteni, a rezgés ugyanis

szintén zajt és technikai nehézséget okoz a mérések során.

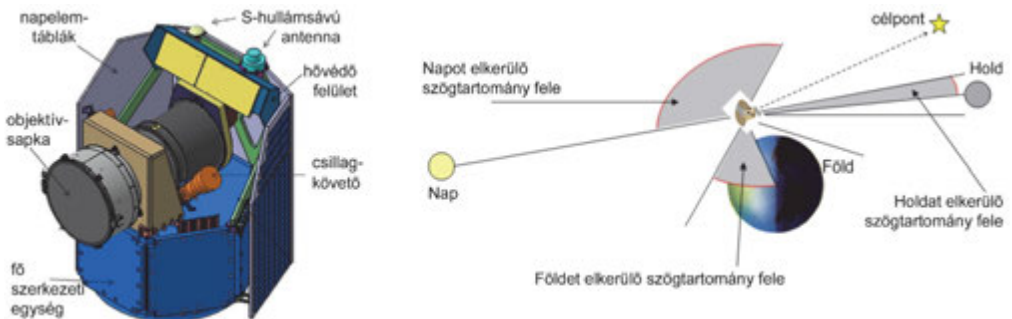
Egyre több exobolygó ismert, fontos lépés a már felfedezett égitestek minél pontosabb megismerése és jellemzése – ami speciális módszert és többnyire űrtávcsövet igényel. A magyar közreműködéssel készült és 2019-ben felbocsátott **CHEOPS űrtávcső** (*CHAracterising ExOPlanet Satellite*) 30 cm-es teleszkópja 700 km magas pályán keringő műholdról elemez egy-egy exobolygóval bíró csillagot, alkalmanként maximum 48 órán keresztül. Már ismert célpontokat vizsgál, amikor azok bolygója vagy bolygói a Földről nézve elhaladnak a csillag korongja előtt és annak kis részét elfedik. Az ekkor fellépett ún. tranzit esemény során a csillag fényessége enyhén csökken, amiből a többi paraméterrel együtt az exobolygó tömege és átmérője alapján a sűrűségét lehet megállapítani. A fedések követéséhez az űrtávcső rendszeresen áll át egy-egy új célpontra 8 ívmásodperc pontossággal, amit 2 csillagkövető és 6 napszenzor, valamint 4 elforgatható reakciókerék biztosít. A célpontra álláshoz a három tengely mentén stabilizált CHEOPS térbeli helyzete fontos, ahol az X tengely mutat a csillag felé – de a többi két irány szerint sokféle térbeli orientációval is beállhat a műhold, amihez a hőstabilitás miatt ideális



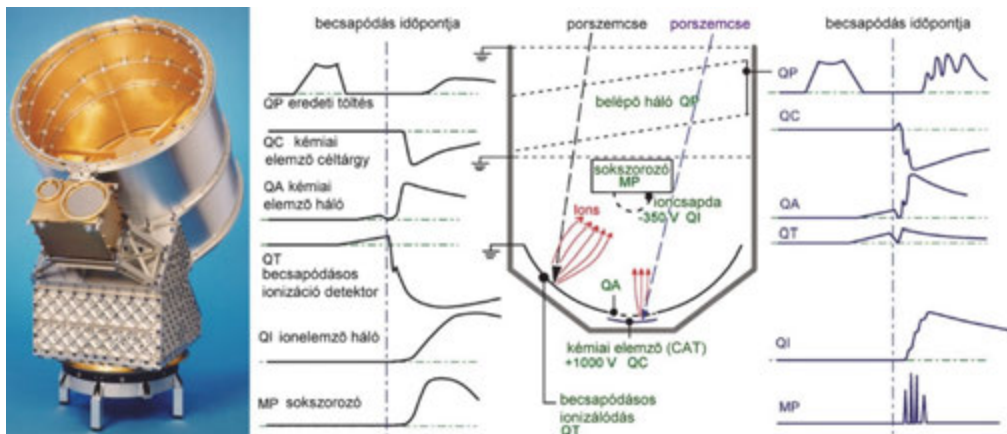
2. ábra: A James Webb-űrtávcső napfényvédő fóliája kinyitott állapotban a Földön (balra), és elvi metszete (jobbra). (Forrás: NASA)

esetet választja ki, elkerülve még a túlmelegedést a napfénytől, valamint a zavaró Földet, Holdat és Napot (3. ábra).

Az összeállt égitesteket közelről a Naprendszerben tudjuk vizsgálni. Az elmúlt évek kutatásai során kiderült, nem csak a Naphoz közelebb keringő Föld-típusú bolygók, de a jégholdak is érdekesek az élet lehetősége szempontjából. Ezek jégpáncélja alatt ugyanis kiterjedt víztömegek helyezkednek el, azonban utóbbiak közvetlen tanulmányozása igen nehéz. Az **Enceladus esetében a mélységi vízből** a jégpáncél repedésein kilövellt anyag szemcséinek elemzésére nyílt lehetőség a Cassini-űrszonda *Cosmic Dust Analyzer* (CDA) műszerével (4. ábra). Ez a berendezés a becsapódó szilárd szemcsék méretét, töltését és sebességét érzékeli. A mindig nagy sebességgel érkező apró szemcsék a hátsó falon szétporladnak, „elizzanak”. Az így keletkező atomok, ionok és elektronok elektromos mezővel szétválaszthatók, és összetételük, valamint egyéb jellemzőik megbecsülhetők. Az Enceladus anyagsugarain át-



3. ábra: A CHEOPS űrtávcső szerkezete (balra) és a célpont megfigyelésével kapcsolatos néhány térbeli megkötés a Nap, a Föld és a Hold környékének elkerülése céljából. (Forrás: ESA)

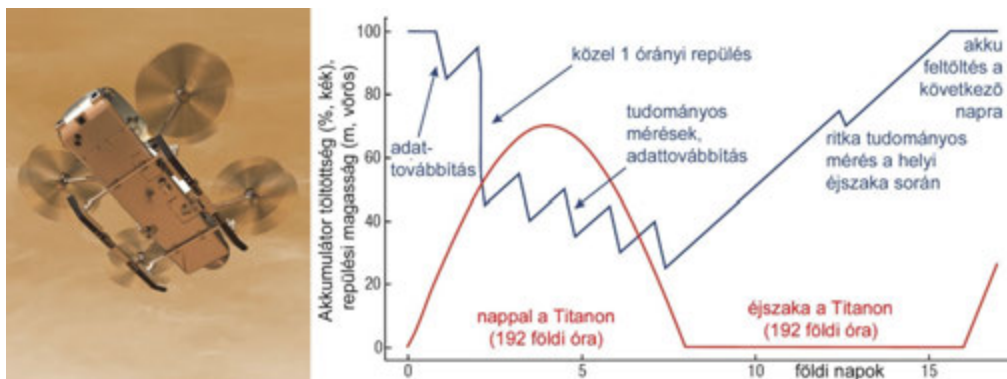


4. ábra: A CDA detektor működési sémája. Balra az Impact Ionisation Target (IIT), jobbra a Chemical Analyzer Target (CAT) detektorba történő becsapódáskor észlelt jelek általános jellemzőit mutató görbék láthatóak [3,4]

haladva a kilövellt nm-es szilikátszemcsék vizsgálatuk alapján 90 Celsius-fok feletti közet-víz reakció során keletkezhetnek. Mindez forró, esetleges vulkáni fűtésű környezetre utal a mélységi „óceánban”.

A Titan Szaturnusz-hold vízfélfelszíne is érdekes célpont, részben az ott lévő metántavak, egykori kiszáradt folyóvölgyek és az égből hulló, a Nap ultraibolya sugárzásának hatására polimerizálódó szerves molekulák miatt. Ezt a távoli, fagyos égitestet fogja elemezni a **Dragonfly nevű, mini helikopterre** emlékeztető drón, amely a tervek szerint 2028-ban startol (5. ábra).

A földinél sűrűbb légkör és gyengébb gravitációs tér miatt a Titanon kb. 40-szer „könnyebb” a repülés. Az űreszköz több helyszínt is meg fog látogatni: nappal repül és leszállva vizsgálódik, éjszaka pedig várakozik. A mindezekhez szükséges energiát és hőt (a Hold felszínén 180 K körüli hideg van)



5. ábra: A Dragonfly űrszonda fantáziaképe repülés közben (balra), valamint a tervezett repülési ütemezés (vörös) és akkumulátor energiaháztartása (kék, jobbra) [5]

radióizotópos termoelektromos generátor szolgáltatja, amely a szonda műszeres „meleg dobozában” helyezkedik el. Összesen 2 kW-ot állít elő, ebből 70 W elektromos teljesítmény, amelyet egy ~100 Wh/kg kapacitású akkumulátorban tárolhat az energiaigényes repülések idejére.

A Mars mind a Föld-típusú égitestek geológiai fejlődése, mind az élet lehetősége szempontjából érdekes. A bolygón lévő kőzetek vizsgálatában a céltárgyhoz érintett ún. kontakt műszereknek üde, mállatlan felszín szükséges. A kőzeteket borító málladéktakarót ezért el kell távolítani – erre szolgál a geológuskalapács a földi terepi munka során. A Marsra ugyanezen feladat ellátására fejlesztették ki a kőzettisztító berendezés (*Rock Abrasion Tool*, RAT) nevű eszközt (6. ábra) – eredetileg a Sprit és Opportunity roverekre, majd tökéletesítették a Curiosity roverre. A RAT egy forgó „kaporó berendezés” a málladék eltávolítására. Alkalmazásának nehézsége egyrészt, hogy nem ismert, milyen a különböző kőzetek málladéktakaróinak keménysége, valamint az eszközt a célpont jellemzőitől függően változó erővel kell a szilárd felülethez nyomni.

A 0,7 kg tömegű, 7 cm x 10 cm méretű és maximálisan 30 W fogyasztású berendezés két ív alakú támasztó felülettel érintkezik a kőzettel, ezeken belül egy tárcsa forog 0–1 fordulat/perc sebességgel. Rajta 23 mm x 6 mm-es, műgyantába ágyazott szintetikus gyémántból álló „fogakat” tartalmazó tárcsa van, amely 3000 fordulat/perc sebességgel is tud pörögni. A RAT maximálisan 45 mm x 5 mm-es hengeres mélyedést vág a célkőzetbe, miközben 10–100 mN közötti „kösörülési erőt” képes kifejteni. Ekkora erővel kell „ellentartani” a rendszert, amelynek pontos értékét maga határozza meg a RAT, alkalmazkodva a célkőzet keménységéhez. Az 1–2 órás üzemelés végén 2 acélkefe söpri le az esetleg ott maradt törmelékszemcséket a megtisztított kőzetről.



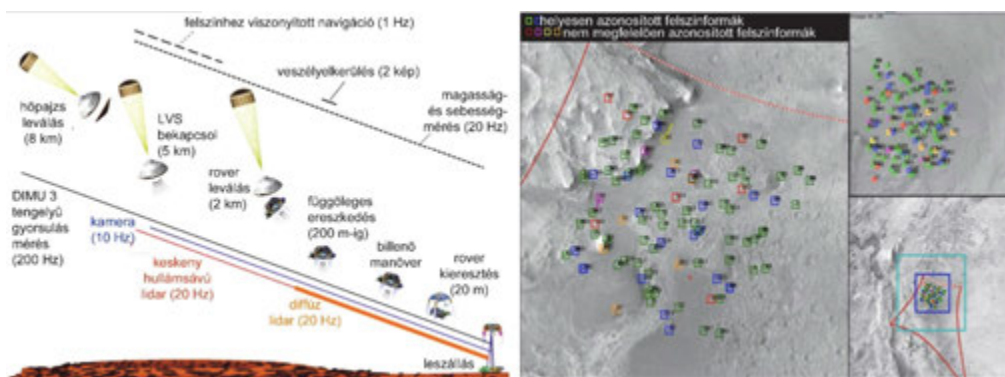
6. ábra: A RAT képe egy földi tesztrover robotkarjának végén (balra) és szerkezeti egységei szemből nézve (jobbra) [6]

A **pontos leszállás a Marson** elengedhetetlen, ha egy konkrét célpontot tervezünk megvizsgálni, avagy az emberes expedícióhoz berendezéseket a felszíni lakóegységhez odajuttatni. Az elmúlt évek két nagyobb marsfelszíni rovere mind az úgynevezett légidaru-technikával landolt a vörös bolygón. Ennek keretében a fékezés első, nehéz fázisát a hővédő pajzs végzi el (amely 1200 °C-ig is felforrósodik). Ezt követően a nagyságrendileg km/s-os ereszkedési sebességet egyetlen ejtőernyő

lassítja kb. 100 m/s-ig. Utóbbit közel 11 km magasságban éri el a szonda, de ez erősen függ a meteorológiai viszonyoktól.

A végső kis sebesség elérését rakétás fékezés biztosítja a légi daru segítségével, melynek végén a kábelben lógó rover függőlegesen kb. 0,75 m/s, vízszintesen pedig max. 0,5 m/s sebességgel éri el a felszínt. A Perseverance rovernél a leszállás pontosítását a fenti műveletek megfelelő autonóm időzítésével növelték. Itt az ernyő nyitásának időzítése a leginkább kritikus, amelyet korábban csak a légköri haladási sebességhez igazítottak, most viszont az ún. felszínhez viszonyított navigáció (*terrain relative navigation*) módszerrel a marsi felszínhez viszonyítva végezték el. A szonda a felszínihez viszonyítja a helyzetét és ez alapján ítéli meg, mikor ideális az ernyő nyitása (*range trigger*) – azt követően ugyanis jelentősen lassul a mozgása és nehezebb a célpont elérése.

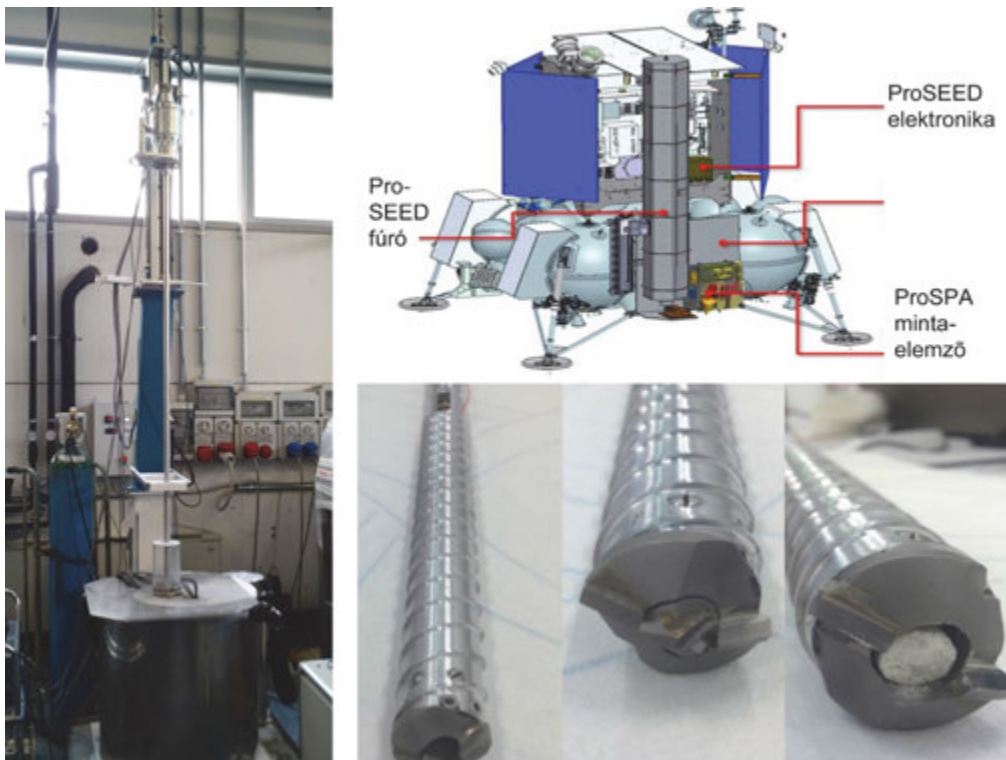
A leszállást segítő MARDI (*Mars Descent Imager*) kamera 1600 x 1200 pixel felbontóképességű detektora 66° látómezejével a felszínt figyeli, így 2 km magasról 1,5 m felbontást ér el. Másodpercenként 5 képet készít, amelyeket egymáshoz hasonlít az oldalirányú sodródás (szélhatás) kiszámításához. A veszélyek elkerülése (*hazard avoidance*) keretében a sziklák és felszíni egyenetlenségek felismerése történik. Továbbá a *Lander Vision System* (LVS) rendszer révén a fotókat egy korábban elmentett HiRISE (*High Resolution Imaging Science Experiment*, a bolygó körül keringő Mars Reconnaissance Orbiter űrszonda nagy felbontású kamerája) felvételhez hasonlítja, így azonosítja a tervezett leszállóhelyet a látómezőben (7. ábra). A hőpajzs leválásától közel 2 perc van az ejtőernyős és a rakétás fékezés fázisára, ennek során kell a lehető legjobban megközelíteni a tervezett célpontot. Az ejtőernyő megfelelő időben történő nyitásával jelentős későbbi oldalirányú mozgást „takarít meg” a rendszer. Az eredmény a tervezetthez képest mindössze közel 5 méter eltérés volt a Perseverance esetében.



7. ábra: A Perseverance leszállásának autonóm irányítás szempontjából fontos fázisai (balra, fent a ferde sávok a mérési típusokat, lent a ferde sávok a műszerek üzemelésének jellemzőit mutatják, a Hz értékek a mérések frekvenciáját jelzik), és a leszállóhely HiRISE képén valamint a MARDI kamerán egyaránt azonosított, pozíciómérésre használt felszínformákkal (négyzetek). A DIMU a leszállóegység belső inerciális mérési rendszerét (Descent Stage Inertial Measurement Unit) jelenti [7]

Az elmúlt években több egymástól független mérés nyomán is kiderült, hogy a **Hold két sarkvidékének** mélyebb és állandóan sötét krátereiben vízjég, illetve egyéb formájú H_2O van jelen. Ennek elemzése eddig csak távérzékeléses módszerekkel történt, most az Európai Űrügynökség (ESA) helyszíni fúrást tervez. Ehhez ún. kriogén mintavétel szükséges, erre fejlesztették az ESA PROSPECT (*Package for Resource Observation and in-Situ Prospecting for Exploration, Commercial exploitation and Transportation*) fúró, mintavevő és elemző műszer-csomagját. Ez eredetileg az orosz Luna-27 leszállóegységen utazott volna, de az orosz-ukrán háború miatt életbe lépett ipari embargó nyomán az orosz partner kiesett. A projekt vezetői azonban sikeresen tárgyaltak a NASA-val, és az Artemis- program keretében, a CP-22 ember nélküli leszállóegységen a tervek szerint mégis a Hold felszínére jut a PROSPECT (8. ábra).

A tervezett mintavétel egyik fő nehézsége, hogy a fúrófej forgásakor, illetve utána annak kihúzásakor a súrlódástól keletkező hő miatt könnyen elszublimálhat a minta jégtartalma. Emellett a kiemelés közben sem süthet rá a Nap, amire az egyébként napelemekkel üzemelő szondánál külön figyelni kell. Ennek megfelelően igen lassan, és a célpont ellenállására (keménységére) figyelve végzi a fúrást a berendezés, hogy minél kevésbé melegedjen az ismeretlen keménységű holdi sarki regolit anyaga.



8. ábra: A holdi sarkvidéki regolitot mintavételező PROSPECT műszer-csomag részei és földi próbája. A fúró-szár tesztelése (balra), a szonda korábban tervezett szerkezete (jobbra fent, amely még az orosz Luna-27 leszállóegységen van ábrázolva), és egy tesztfúrás eredménye (jobbra lent). (Forrás: ESA / Finmeccanica)

Irodalomjegyzék:

- [1] Bacsárdi L. (2021): Űrmérnökképzés testközelből. GIS Open Konferencia, Székesfehérvár, <http://w20.gisopen.hu/eloadasok/2021/I6.pdf>
- [2] Takácsné Farkas A., Kiss Cs. (2023): The impact of serpentinization on the initial conditions of satellite forming collisions of large Kuiper belt objects. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 135, 124402
- [3] Kempf S. et al. (2012): The Cosmic Dust Analyser Data Handbook, Version 0.1. Planetary Data System, <https://sbn.psi.edu/pds/resource/cdaDataHB-5-4-17.pdf>
- [4] Srama R. et al. (2004): The Cassini Cosmic Dust Analyzer. *Space Science Reviews*, 114, 465
- [5] Glaze L.S., Webb C. (2023): Explore Science. NASA Planetary Science Advisory Committee presentation, <https://science.nasa.gov/wp-content/uploads/2023/11/day1-pac-glaze-final.pdf>
- [6] Myrick T.M. et al. (2004): Rock Abrasion Tool. 37th Aerospace Mechanisms Symposium, Houston, TX, USA, <https://esmat.eu/amspapers/pastpapers/pdfs/2004/myrick.pdf>
- [7] Johnson A.E., Golombek M.P. (2012): Lander Vision System for Safe and Precise Entry Descent and Landing. *Concepts and Approaches for Mars Exploration*, Houston, TX, USA, 4341

Időszakos vízborítás és vegetáció vizsgálata egy marsi analóg területen Marokkóban, Landsat műholdfelvételek segítségével

Varga Nándor

Eötvös Loránd
Tudományegyetem
Berzsenyi Dániel
Pedagógusképző
Központ Földrajzi
Tanszék,
Szombathely

A Mars megismerése számára fontos kutatási helyszínek a Földön azok a térségek, amelyek valamilyen szempontok alapján marsi analóg területeknek tekinthetők: vagy szélsőségesen szárazak, esetleg hidegek, csak időszakosan vízzel kitöltött területek [1], vagy intenzív ultraibolya sugárzás jellemző rájuk, a szemcsék Mars-releváns szállítása elemezhető [2], esetleg az emberes expedíciók készíthetők elő a területen [3]. Az egyik ilyen helyszín Marokkóban, a Szahara északnyugati térségében, Drâa-Tafilalet régió északkeleti részében a Dajet Srij-tó és tágabb környezete. A területet 2018-ban a Konkoly Thege Miklós Csillagászati Intézet szakemberei vizsgálták az Ibn-Battuta Center munkatársaival, amiről tanulmányukban részletesen beszámoltak [4]. Ennek a területnek a távérzékeléses módszerrel történő elemzését végzem ezen cikkben, amelyben Landsat-8 műholdfelvételeket használok fel. A munka célja elsősorban az, hogy megállapítsam, hogyan változik a vizes felszínborítás az adott területen egy csapadékos időszakot követően, ezzel együtt a Dajet Srij-tó kiterjedése hogyan módosult közel 1 év alatt, és milyen változásokat mutat a vegetáció. Az alábbi eredmények arra is példát mutatnak, miként lehet földi távérzékeléses adatokból Mars-releváns, ideális esetben az oda küldendő űreszközök tervezéséhez is hasznos megállapításokat tenni.

Munkamódszerek

A képelemzés során Landsat-8 műholdfelvételeket használtam fel. A vizsgálatokhoz három sávot választottam ki, a 4-es, 5-ös és 6-os sávokat. Ezek a vörös (R), az infravörös tartományból pedig a közeli és a közepes sávok (NIR, SWIR). A szíkompozitok ezen sávokból való összeállítása segíti a növényzettel és a vízborítással kapcsolatos megfigyeléseket. Könnyebben meg tudtam különböztetni az egyes felszínformákat és így tematikus térképeket készíthettem, amelyek alapján számszerűsíteni tudtam a vizsgált felszínformák kiterjedésének időbeli változását. Ezek a felszínformák a szabad felszínű vízfelület, növényzet, homokos felszín, hegyvidéki terület. Ezek mellett 1972-től kigyűjtöttem az EO Browser [5] timelapse funkció segítségével évszakonként azokat az éveket, amikor nyílt vízfelszín volt a Dajet Srij-tó medrében.

A műholdfelvételek feldolgozását az IDRISI Selva szoftverrel [6] végeztem a következő módon. Először a szoftverben a *File / Import, Geotiff / Tiff* menüpont alatt megnyitottam a már előzőleg kiválasztott Landsat-8 műhold 4, 5, 6 jelű sávjait. Ezekből a *Create Color Composit* menüpont alatt hamisszínes felvételeket hoztam létre. Az elemzés első fontos lépése volt a szegmentálás, amelyet az *Image Processing / Segmentation Classifiers / Segmentation* menüpontban végeztem. Itt behívtam a három sávot, elindítottam a folyamatot és létrejött egy poligonokból álló réteg, amelyet majd a tanulóterületek kiválasztásában tudtam használni. Ezt a réteget a hamisszínes felvétel rétegére rátettem. Ezen poligonok segítségével tanulóterületeket jelöltem ki a különböző felszínborításoknak megfelelően az *Image Processing / Segmentation Classifiers / Segtrain* menüpont segítségével. Ezek a nyílt vízfelületet, a hegyvidéknek megfelelő felszínt, a növényzetet és a homokos területeket jelentették. A hegyvidéki terület felszíne nagy felbontású Google Earth képen megfigyelve egy sötétszürke porral fedett területtípus, és a felszínen látható autóforgalomra utaló nyomok vannak, színe valós színes felvételen főleg sötétszürke árnyalatú.

Ezután következett az osztályozás lépése. Ezt az *Image Processing / Hard Classifiers / Maxlike* menüpont segítségével végeztem el. Ezzel a folyamattal a felszínborításról létre tudtam hozni tematikus térképeket. Az egyes felszínborítás-típusok területi kiterjedésére vonatkozóan a térkép jelmagyarázatára jobb egérgombbal kattintva elérhető a *Calculate Area* menüpont, amellyel a szoftver automatikusan kiszámolja a megadott mértékegységben az egyes felszínborítások területi kiterjedését.

A műholdfelvételek vörös és közeli infravörös sávjainak felhasználásával NDVI térképet is készítettem a területről. Az NDVI (normalizált differenciális vegetációs index) a növényzet vegetációs aktivitását mutatja. A -1 -től $+1$ -ig terjedő skálán $0,1$ -es érték felett valamilyen növényzet jelen van a felszínen, $0,6$ -tól jellemzően sűrű növényzettel borított egy felszín.

A felhasznált műholdképek

A csempe számáról a WRS (*Worldwide Reference System*) katalógus ad felvilágosítást. Minden képet azonosít egyrészt 6 számjegy – amelyek közül az első három szám a keringési pályát jelenti, az utolsó három pedig a pályákon az adott sort –, másrészt pedig a felvételezés dátuma. Minden műholdfelvétel könnyen azonosítható ezen pálya, sor és felvételezési idő megadásával (1. táblázat).

A WRS-1 számozást a Landsat-1-3 műholdaknál alkalmazták, amikor 18 napos volt a műholdak keringési ideje. Amikor 16 napos lett a keringési idő, akkor bevezették a WRS-2-t. A Landsat-4-9 esetében 233

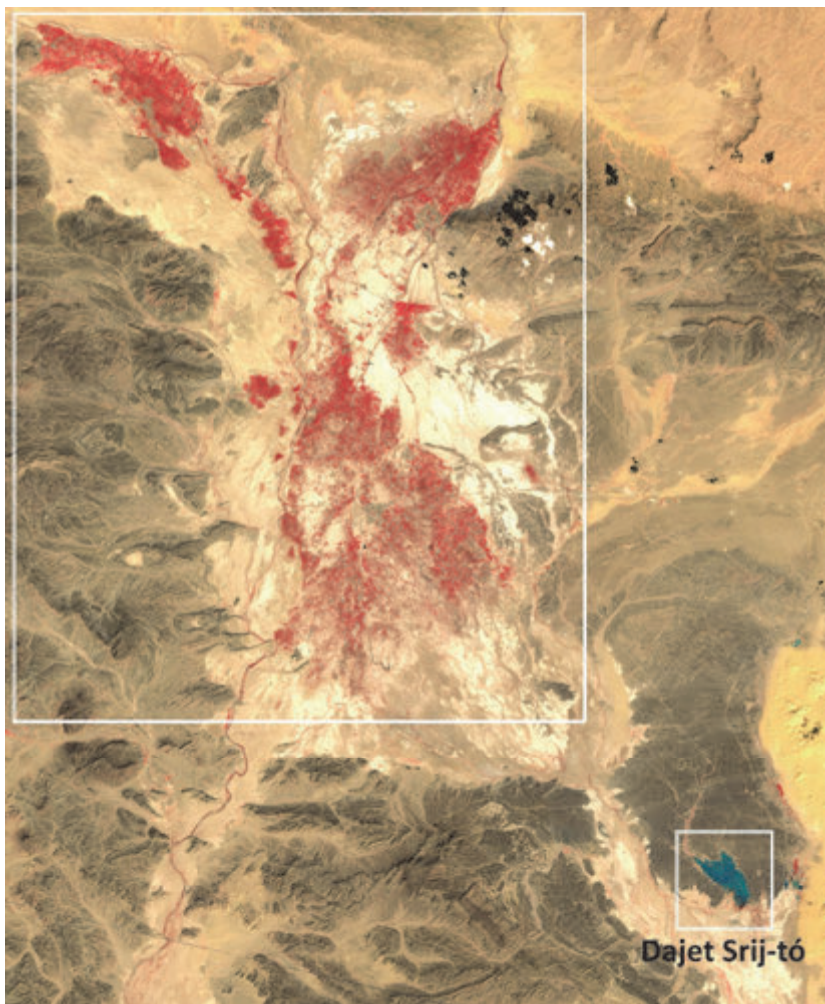
1. táblázat: A vizsgálathoz felhasznált műholdfelvételek adatai

Landsat-8	
Csempe	Dátum
200038	2018-09-10
199039	2018-09-19
199038	2018-11-06
200038	2019-02-01
200038	2019-04-06
199039	2019-06-18

pálya van, 001-től 233-ig tart a számozása keletről nyugatra. A 001-es pálya a $64^{\circ}36'$ nyugati hosszúságnál metszi az Egyenlítő síkját. A sorok számozásánál 248 sort számoznak és a 60. számú sor illeszkedik az Egyenlítőre a műhold észak-déli (leszálló) irányú keringésekor. Minden pálya első sora a $80^{\circ}47'$ északi szélességnél kezdődik.

Eredmények

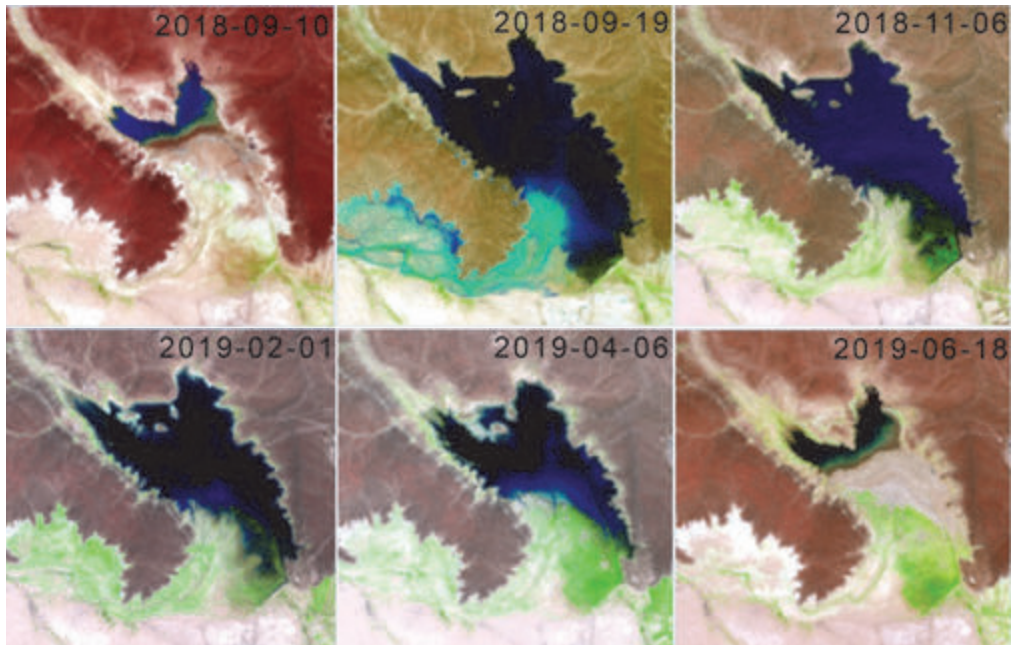
A vizsgált területnek és szűkebb környékének áttekintő képe az 1. ábrán látható 2018. október 12-i hamisszínes műholdfelvételen, a száraz időszak vége felé. A kicsi kép jobbra lent a Dajet Srij-tavat mutatja, amelynek zöldes színe jelzi, hogy a mederben éppen nagyobb kiterjedésű vízfelület van. Et-



1. ábra: Áttekintő műholdfelvétel a vizsgált területek földrajzi elhelyezkedéséről

től északnyugatra pedig a másik vizsgált terület egy völgy, ahol piros színben kiterjedtebb vegetáció azonosítható.

Elsőként a Dajet Srij-tavat és szűkebb környezetét vizsgáltam, ahol egy csapadékos időszakot követően 2018. szeptembertől egészen 2019. június hónapig tanulmányoztam a tó nyílt vízfelületének kiterjedését és ezzel összefüggésben a környéken megjelenő vegetáció területi kiterjedését. A vizsgált időszakból 6 műholdfelvételt választottam ki, amelyek 2018. szeptember 10-től 2019. június 18-ig követik nyomon a tó felszínének gyors növekedését és az ezt követő fokozatos csökkenését (2. ábra).



2. ábra: Landsat-8 hamisszínű műholdfelvételek a Dajet Srij-tóról és környezetéről

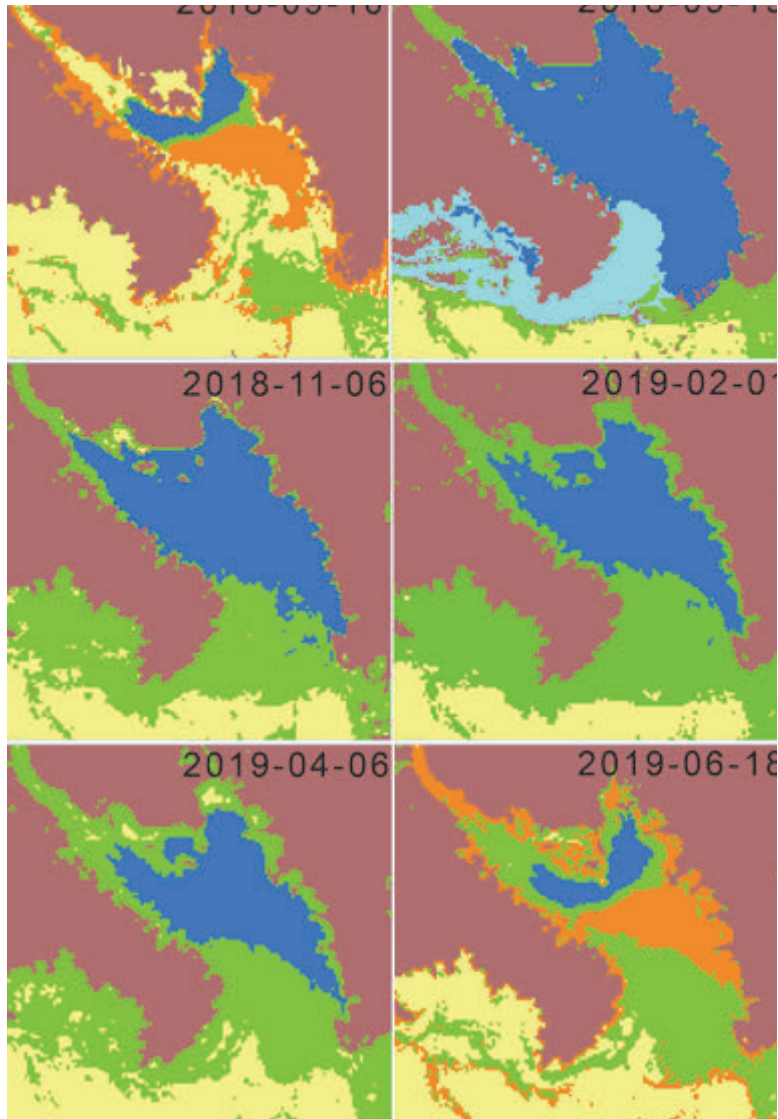
Ezekből a műholdfelvételekből készítettem tematikus térképeket a felszínborításról. A jelmagyarázat színskódolása a 3. ábrán látható.

Kék színnel jelöltem a tó medrében azt a területet, amely nyílt vízfelszínt mutat. A homokos területről két kategóriát készítettem. Az egyik a „homokos”, ami száraz terület, illetve a „homokos (nedves)”, ami először a csapadékos időszak után közvetlenül érzékelhető a tómederben, majd ahogy a nyílt vízfelszín kiterjed és később elkezd visszahúzódni és a meder egy részén nem érzékelhető már növényzet (2019.06.18.), akkor ismét megjelenik. Vélhetően azért, mert a tó medrének kiszáradása nem azonnal megy



3. ábra: A tematikus térképek jelmagyarázata

végbe és a felszín megtartja egy ideig a nedvességtartalmát. A 2018.09.19. időpontban készült képen (2. és 4. ábra) látható csak az „időszakos elöntés” területe. Ezen a tóból kijövő folyók annyira bővizűek, hogy a homokos területen rövid ideig kilépnek a medrükből.



4. ábra: A Dajet Srij-tó és környékének tematikus térképei a felszínváltozásról 2018.09.10. és 2019.06.18. között, ahol a kék szín a nyílt vízfelszínt, a sárga és narancssárga a homokos területet, a barna a tó környezetének hegyvidéki területét, a zöld a növényzetet, a halványkék pedig az időszakos vízfolyásokat, elöntött területeket mutatja

A 2018–2019 között vizsgált időszak, előtt 2014. októbertől 2015. május végéig volt hasonló vízborítás a mederben, ami hosszabb ideig tartott. 2017.10.09-én a meder kb. egyharmadát borította nyílt vízfelszín, ami csak pár hétig maradt meg. A vizsgálatban foglalt időszak után, 2019. szeptember hónapban a meder kb. 40%-át borította nyílt vízfelszín, ez november végéig fokozatosan visszahúzódott. 2020. március 23-án ismét az egész meder területét borította nyílt vízfelület, ami május végéig megmaradt és csak utána kezdett lassan kiszáradni. A legkisebb nyílt vízfelszín 2020. szeptember végén tűnt el a mederből. Mindezek a változások a 2. ábrán figyelhetők meg.

A klímadiagramok magyarázattal szolgálnak arra, hogy miért és milyen időpontokban növekedett meg a műholdfelvételen a tó medrének nyílt vízfelülete. A csapadék és hőmérsékleti adatok a Dajet Srij-tó-tól 3 km-re keletre található Merzouga településhez tartozó mérőállomás adatai (5. és 6. ábra) [7].



5. ábra: 2018. szeptemberének csapadék- és hőmérséklet-diagramja

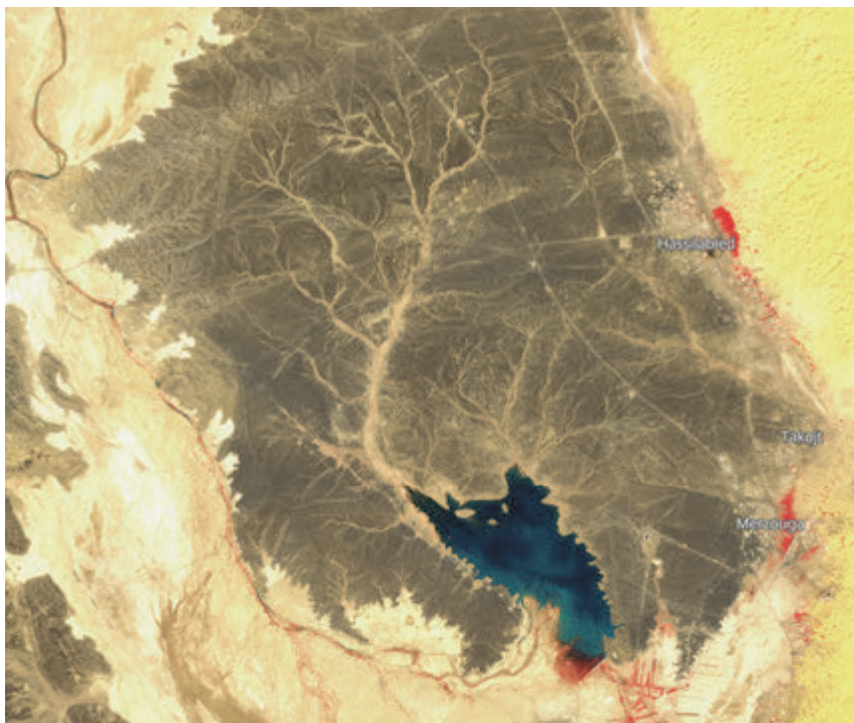


6. ábra: 2014. szeptemberének csapadék- és hőmérséklet-diagramja. Később, 2014. októberben volt összesen 50 mm csapadék, novemberben 40 mm, decemberben pedig már nem volt semmi

Két nagyobb csapadékmennyiség hullott 2018 szeptemberében a tó környékére, szeptember 11-től 14-ig, illetve 17-én és 18-án (5. ábra). Ezt követően a szeptember 19-i műholdképen már a tó teljes medencéjére kiterjedő nyílt vízfelszint láthatunk (2. és 4. ábra). Ugyanez játszódott le a fentebb említett 2014 októbertől. Ebben az esetben, ahogy a diagramon is látható (6. ábra), szeptember 20–24. között esett nagyobb csapadékmennyiség. Ezen néhány nap után a legkorábbi műholdkép október 1. volt, amikor a 2018. szeptember 19-ihez hasonló méretű nyílt vízfelületet lehetett látni. 2014. októberben és novemberben összesen közel 90 mm csapadék esett.

A 2020. március 20. után történt vízzel való feltöltődést azonban kiugróan magas csapadéktételek a Merzouga mérőállomásról nem magyarázzák, mivel csupán 4,5 mm csapadék esett március 21–25. között. Véltetően a tótól északra lévő magasabb területeken is esett csapadék, amely az időszakos folyók medrében jutott ide és fel tudta tölteni a tó medrét. Ezt talán megmagyarázhatja a 7. ábra, amely egy Sentinel-2 műholdfelvétel (10 m/pixel felbontású). Ezen látható az ideiglenes vízfolyások hálózata a tótól északra és ahogy ezek a kisebb-nagyobb erek a tó felé tartanak. Ezen a területen pedig a Merzouga állomáson mért csapadéktól eltérő mennyiség is eshet, ami fel tudja tölteni a tavat. (Az időben legközelebbi nagyobb csapadék 2020. április 19-én volt, 29 mm).

A tematikus térkép adatai alapján a vízborítás és a vegetáció kiterjedése a 2. táblázatban és a grafikonon (8. ábra) látható módon alakult. A tó területe lassan csökkenni kezdett 2018.09.19-től, de a vege-



7. ábra: Dajet Srij-tó (lent) és környezete 2020-03-26, csapadékos időszak utáni állapot

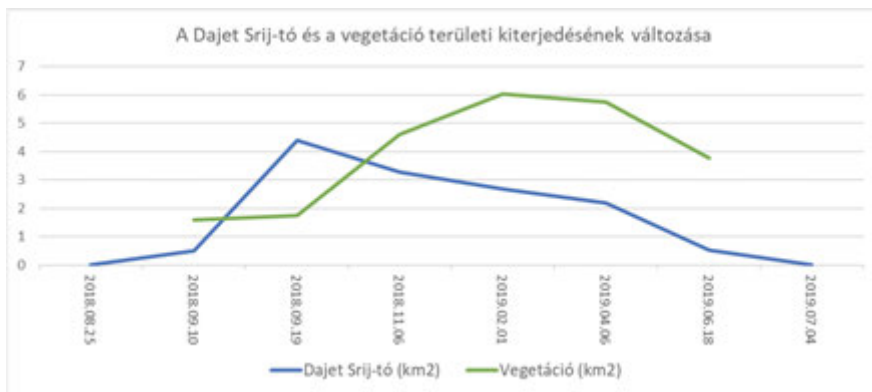
táció kiterjedése még ezután egészen 2019 áprilisáig növekedett a vizsgált területen, és csak ezután kezdett csökkenni.

2. táblázat: A Dajet Srij-tó nyílt vízfelületének és a vegetáció területi kiterjedésének változása a vizsgált időpontok alapján

Műholdfelvétel ideje	Dajet Srij-tó (km ²)	Vegetáció (km ²)
2018-09-10	0,50	1,58
2018-09-19	4,40	1,76
2018-11-06	3,29	4,59
2019-02-01	2,69	6,02
2019-04-06	2,19	5,74
2019-06-18	0,52	3,78

3. táblázat: A vegetáció összehasonlítására felhasznált három műholdfelvétel adata

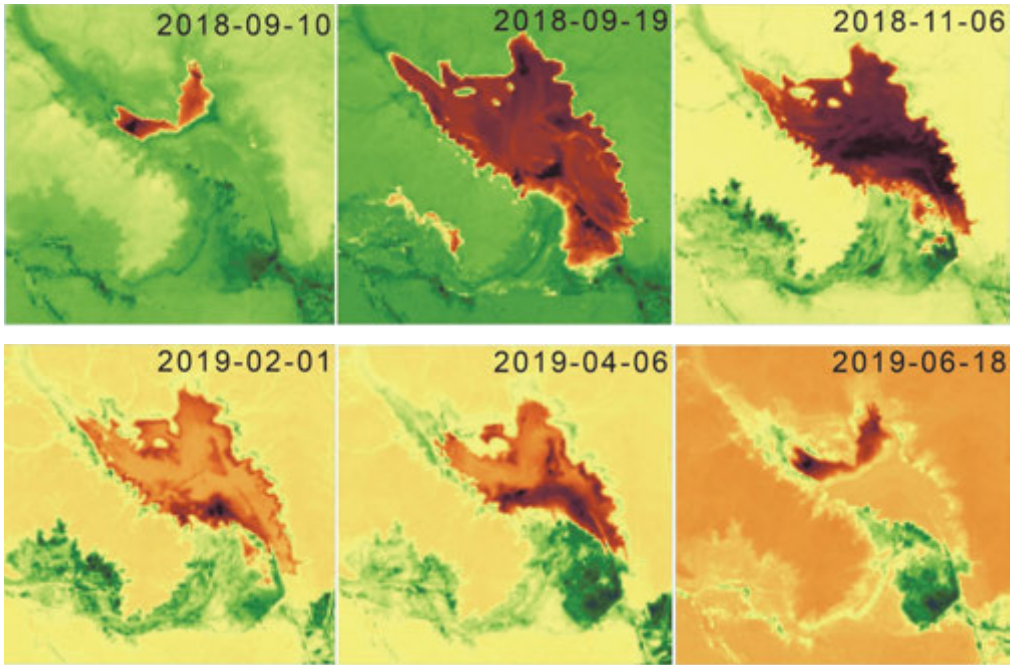
Landsat-8	
Csempe	Dátum
200038	2018-10-12
200038	2019-02-01
200038	2019-06-25



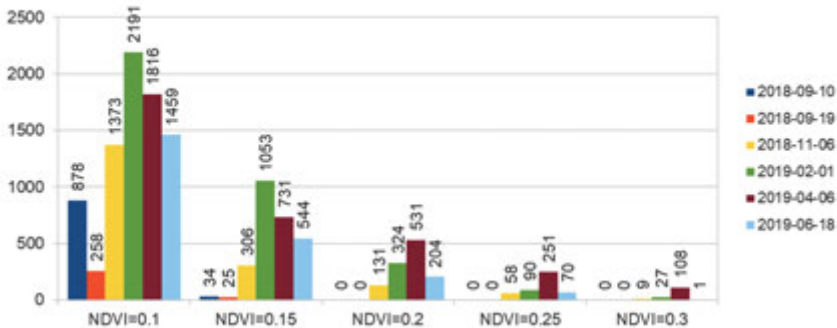
8. ábra: A Dajet Srij-tó és a vegetáció területi kiterjedésének változása

A normalizált vegetációs indexszel (NDVI) is megvizsgáltam a tó környezetét. Itt arra voltam kíváncsi, hogy a növényzet milyen NDVI értékeket vesz fel, és az egyes értékeknek milyen a gyakorisága. Általában ritka növényzet jellemzi a területet, ezért az NDVI értékek alig közelítik meg a 0,4-et. A vegetációs terület növekedése 2019-es év első harmadában is látható az adatok alapján. Ebből arra következtek, hogy a tó területnek csökkenésével párhuzamosan a talaj nedvességtartalma továbbra is hónapokon keresztül elegendő volt ahhoz, hogy a növényzet számára biztosítson elegendő vizet. Nyár elejére viszont a tó medrének lassú kiszáradásával már a vegetációs terület nagysága is elkezdett csökkenni. A grafikonokról leolvasható (9. ábra), hogy az NDVI értékekhez tartozó pixelgyakoriságok értékei 2019-ben magasabbak a 2018-as értékekhez képest.

Egy másik, a Dajet Srij-tótól északnyugatra fekvő völgyben található területen (településekkel, növényborítással, időszakos vízfolyásokkal) szintén megfigyelhetők időbeli változások. Ezt a vidéket három műholdfelvételen hasonlítottam össze (10. ábra). Az egyik 2018. október 12-én készült, a második 2019.

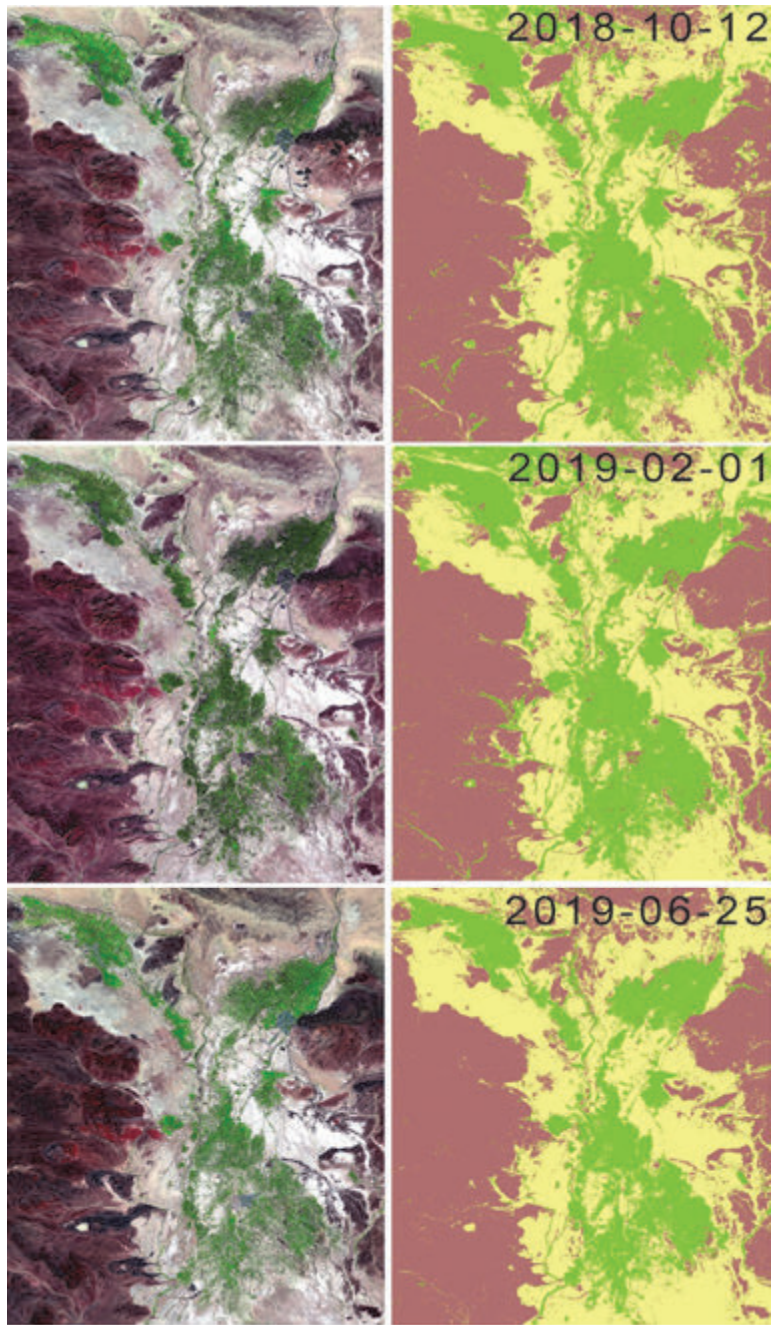


NDVI értékek pixelgyakoriságának változása a Dajet Srij-tó környékén



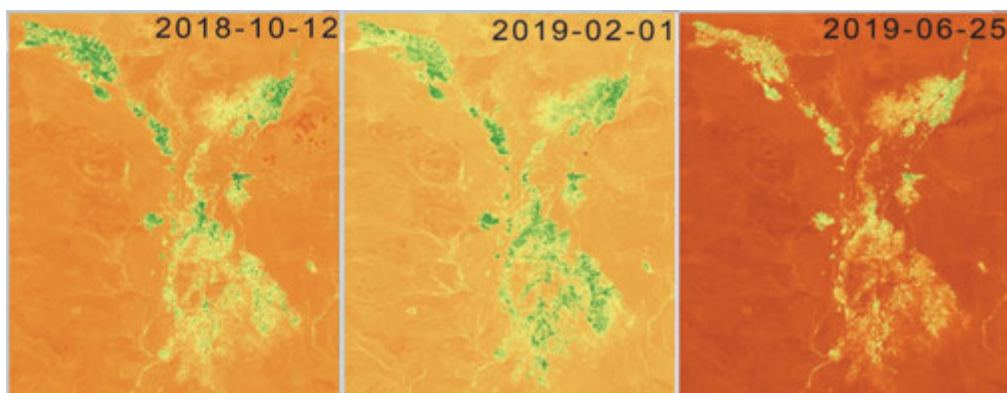
9. ábra: A Dajet Srij-tó környékének NDVI képei (fent), valamint NDVI értékei és pixelgyakoriságok változása (lent). A vízszintes tengelyen az NDVI értékek láthatók, a függőleges tengelyen az NDVI értékekhez tartozó pixelek gyakorisága. A színek az időbeli változást mutatják

február 1-én, a harmadik pedig 2019. június 25-én. A műholdképek alapján elkészítettem ezekre is a tematikus térképeket, amelyeken a vegetáció kiterjedésére voltam kíváncsi és a NDVI értékek segítségével azt is megnéztem, hogy dúsabb vagy gyéresebb növényzet jellemzi-e a területet.

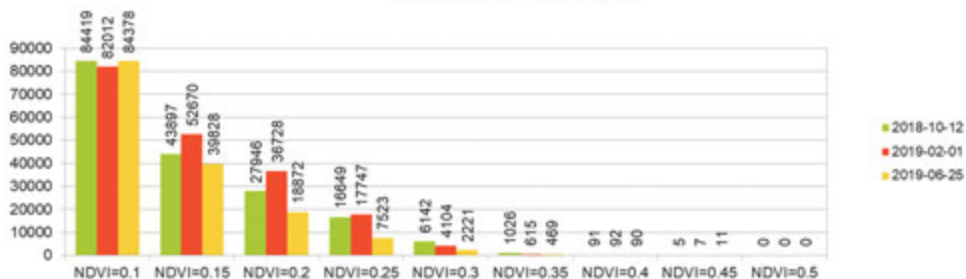


10. ábra. A Dajet Srij-tótól északkeletre található völgy hamisszínes műholdfelvételei és az ezekből létrehozott tematikus térképek (első képpár dátuma: 2018.10.12., második képpár: 2019.02.01., harmadik képpár: 2019.06.25.)

A Dajet Srij-tótól északnyugatra fekvő területet két módon vizsgáltam. Egyrészt a hamisszínes műholdfelvétel alapján elkészítettem három időpontra a terület tematikus térképét (10. ábra) és a szoftver segítségével kiszámoltam a növényzet területi kiterjedését. A másik módszer pedig az NDVI értékek alapján elkészített ábra (11. ábra), amellyel a vegetáció minőségi jellemzőit figyeltem meg és arra a kérdésre kerestem a választ, hogy milyen NDVI értékek jellemzőek ezen a területen és ezekhez mennyi pixel tartozik. A vizsgálat során megfigyeltem a tematikus térképekből kiszámított adatok alapján, hogy a növényzet 2018. október 12-én 209,57 km² kiterjedésű volt, majd 2019. február 1-én 338,92 km² lett. Ez párhuzamba hozható a Dajet Srij-tó hasonló adataival (2. táblázat), ahol a vegetáció az idősoros vizsgálat alapján ebben az időpontban volt a legmagasabb. A völgyben a növényborítás 2019. június 25-re lecsökken, 231,03 km²-re. Ha ezzel párhuzamosan megfigyeljük a 11. ábra grafikonját, az látható, hogy amíg a 0,1-es NDVI értékben a három időpont között a pixelgyakoriság tekintetében nincs számottevő eltérés, addig az NDVI 0,15 és 0,35 közötti tartományban nagy különbségek mutathatók ki. A legmagasabb pixelgyakoriságok a 2019. február 1-i időpontban mutatkoznak, a legkisebbek pedig 2019. június 25-én. Mindez párhuzamban van a tematikus térképen számolt növényborítás területi csökkenésével és a Dajet Srij-tó környékén a pixelgyakoriságok tekintetében is ugyanez a változás mutatható ki (9. ábra).



A Dajet Srij-tótól északnyugatra fekvő völgy növényzetének NDVI értékei és pixelgyakoriságuk változása



11. ábra: A Dajet Srij-tótól északnyugatra fekvő völgy növényzetének NDVI képei (fent), valamint NDVI értékei és pixelgyakoriságuk változása (lent). A vízszintes tengelyen az NDVI értékek láthatók, a függőleges tengelyen az NDVI értékekhez tartozó pixelek gyakorisága

A Landsat-1, -2, -3, -5, -7 és -8 műholdfelvételek alapján az alábbi években volt nyílt vízfelszín a Dajet Srij-tó medrében 1972-től. Ezt úgy állapítottam meg, hogy egy online felületen, az EO Browser oldalon [5] van egy lehetőség, hogy időben timelapse funkcióval, egyéni beállításokkal végignézzem a műholdképeket. Ezt úgy állítottam be, hogy minden hónapban mutasson egy műholdfelvételt és ez alapján gyűjtöttem ki az éveket, majd ezeket évszakonként csoportosítottam.

- Tavasz (március, április, május): 1979, 1980, 1990, 1994, 1995, 1996, 2000, 2002, 2007, 2008, 2009, 2010, 2015, 2019, 2020
- Nyár (június, július, augusztus): 1975, 1979, 1990, 1996, 2000, 2006, 2007, 2009, 2010, 2020
- Ősz (szeptember, október, november): 1979, 1986, 1989, 1994, 1995, 1996, 2006, 2008, 2009, 2018
- Tél (december, január, február): 1975, 1979, 1986, 1989, 1990, 1993, 1994, 1995, 1996, 2004, 2006, 2007, 2008, 2009, 2010, 2014, 2015, 2018

Összefoglalás

A jelen cikkben vizsgált területek, a Dajet Srij-tó és a tőle északnyugatra lévő völgy műholdképes elemzésében jól látszik a csapadék utáni vízborítás és a vegetáció változása. A 2018. szeptemberben lehullott csapadékot követően először a tómederben nagyobb vízfelszín jelent meg, amelynek területe 2019 nyaráig fokozatosan csökkent. A csapadék mennyiségétől függően a tóból a folyó kiléphet a medréből és a víz elöntheti rövid ideig a folyó melletti területet. Ez látszik a 2. és 4. ábrán 2018.09.19-i időpontban halványkék színnel. A szeptemberi csapadék a vegetációra is hatást gyakorolt a tó környékén: kiszáradt a terület, amit a vegetációs index értékei is mutatnak a hamisszínes műholdfelvételek mellett. A tó vízfelszínének visszahúzódásával a mederben is megjelent a növényzet, ezért megfigyelhető, hogy a növényborítás kiterjedése növekedett a víz visszahúzódásával (2. táblázat). A tó közelében lévő völgyben megvizsgálva a vegetáció tulajdonságait, annak területi kiterjedése és az NDVI értékek pixelgyakoriságainak növekedése (11. ábra) éppúgy jellemző, mint a Dajet Srij-tó szűkebb környezetében (9. ábra). A Dajet Srij-tó vizsgálatánál a tematikus térképen külön nem jelenik meg az a terület, amely vízzel borított ugyan, de nem szabad vízfelület, hanem már jelen van a vegetáció. Ezek a hamisszínes műholdfelvételeken úgy jelennek meg, elősorban a meder déli részén, hogy a sötét színű pixelek közé, amelyek víz jelenlétét mutatják, halványzöld színű pixelek keverednek, ami a vegetáció jele. A tematikus térképen megjelenő kategória, a nedvesebb homokos rész pedig a hamisszínes felvételeken úgy jelenik meg, hogy a világosabb színű környezeténél néhány árnyalattal sötétebb terület, ami véleményem szerint a mederben lévő nedvesebb réteget mutatja. További vizsgálatra érdemes, hogy az ilyen nedves, de nem szabad vízfelülethez hasonló területek a Marson vannak-e, illetve az itt vizsgált spektrális sávok vajon képesek lennének-e hasonló „talajnedvesség” kimutatására a vörös bolygón, esetleg a tavasszal visszahúzódó jégsapka nyomában.

2018. szeptember és 2019. február hónapok között az adatok alapján a vegetációs területek növekedtek. Ezt követően pedig lassú csökkenés kezdődött. 2019. június közepére nagyobb területi csökkenés történt (2. táblázat és a 8. ábra). A megfigyelések alapján úgy látszik, hogy a Dajet Srij-tó vízfelületének csökkenésével a mederben megmaradó nedves terület lehetőséget ad a növényzetnek, hogy kiterjed-

jen a felszínen (4. ábra). A csapadékmennyiségek bár alacsonyok – csupán néhány milliméter vagy néhány tíz milliméter 5–10 nap alatt –, de elengedhetetlenek akár a tó, akár a vizsgált völgy vegetációja számára. Az időszakos vízfolyások hálózata is fontos a víz levezetése szempontjából a dombsági területekről a tó és a völgy felé. Mindezek látványosan demonstrálják, miként lehet egy lakott területtől távoli, sivatagi vidéken az időszakosan megjelenő nedvesség következményét ingyenesen elérhető műholdképek alapján rekonstruálni.

Ezen tanulmány az ELTE TTK Földtudományi Doktori Iskolában hallgatható *A Mars földrajza és geológiája* című tantárgy keretében született, és a szerző doktori kutatásához kapcsolódik.

Irodalomjegyzék

- [1] Steinmann V. et al. (2020): *Geomorphological analysis of Tinto-B Vallis on Mars. Hungarian Geographical Bulletin*, 69, 333
- [2] Kapui Zs. et al. (2018): *Fluvial or aeolian grains? Separation of transport agents on Mars using Earth analogue observations. Planetary and Space Science*, 163, 56
- [3] Orgel Cs. et al. (2014). *Scientific Results and Lessons Learned from an Integrated Crewed Mars Exploration Simulation at the Rio Tinto Mars Analogue Site. Acta Astronautica*, 94, 736
- [4] Kereszturi Á. et al. (2018): *Mars-Relevant Field Experiences in Morocco: The Importance of Spatial Scales and Subsurface Exploration. Astrobiology*, 18, 10
- [5] Sentinel Hub EO Browser, <https://apps.sentinel-hub.com/eo-browser/>
- [6] <https://clarklabs.org/terrset/idrisi-gis/>
- [7] Klímaadatok: <https://weatherandclimate.com/morocco/draa-tafilalet/merzouga/september-2018>

A James Webb-űrtávcső elképesztő szupernóva-felvételei

Könyves-Tóth Réka

A legtöbb csillagászat, illetve űrkutatás iránt érdeklődő hallott már az emberi technológia egyik csodájaként számon tartott, 6,5 méteres tükörátmérőjű James Webb infravörös űrtávcsőről (James Webb Space Telescope, JWST), amelyet 2021 decemberében bocsátottak fel a Nap-Föld-rendszer L_2 Lagrange-pontjának környezetébe. A távcső fő küldetesei közé tartozik az Univerzum legidősebb csillagainak, illetve galaxisainak vizsgálata, valamint a fiatal, esetlegesen az élet kialakulására alkalmas bolygórendszerek tanulmányozása. Működésének első két éve alatt a JWST beváltotta a hozzá fűzött reményeket lélegzetelállító felvételek és a Világegyetemről alkotott képünket formáló tudományos eredmények formájában. Ebben a cikkben az űrtávcső azon magyar részvételű, illetve nemzetközi eredményeit foglaljuk össze, amelyek a csillagok halálakor bekövetkező szupernóva-robbanásokhoz köthetők.

HUN-REN
Csillagászati és
Földtudományi
Kutatóközpont
Konkoly Thege Miklós
Csillagászati Intézet,
Budapest

Az SN1987A jelű történelmi szupernóva maradványának észlelése

A szupernóvák a bizonyos csillagok életútjának végén bekövetkező, hatalmas energiafelszabadulással járó robbanások, amelyeket az égbolton hirtelen megjelenő „új csillagként” akár a legtávolabbi galaxisokban is megfigyelhetünk. Napjainkra szupernóva-robbanások tízezeiről állnak rendelkezésre fotometriai, illetve spektroszkópiai adatok, ám felrobbanásuk fizikája még jelenleg is aktívan kutatott területe a csillagászatnak. Különlegesnek számítanak azok a szupernóvák, amelyek a Tejútrendszerben, a mi galaxisunkban, illetve a hozzánk közeli galaxisokban robbantak, hiszen ezeket történelmi szupernóva-észlelések formájában már az ókor csillagásza is megfigyelhették.

Az 1987-ben feltűnt, SN1987A nevű szupernóva az egyik legismertebb és legnagyobb részletességgel elemzett csillagrobbanás, hiszen a Tejútrendszer egyik kísérő galaxisában, a Föld déli félgömbjéről megfigyelhető Nagy Magellán-felhőben robbant fel, és rendkívüli fényessége miatt még szabad szemmel is látszott. Az SN1987A szülőobjektuma egy, a Napunk tömegének 20-szorosát is meghaladó kék szuperóriás csillag volt. Az ilyen csillagok a robbanásuk előtti időszakban csillagszél formájában lefújják külső burkaikat, amely anyaggal később kölcsönhatásba lépnek a felrobbanó csillag nagy sebességgel távoluló, levett rétegei, ezzel újabb felfénylést okozva. Az SN1987A maradványa esetén ez a kölcsönhatás az objektum körül az infravörös tartományban fénylő gyűrű formájában figyelhető meg még napjainkban is, így ez az igencsak közeli szupernóva-maradvány az utóbbi évtizedekben ígéretes célpontnak bizonyult. Ennek megfelelően a James Webb-űrtávcső NIRCам nevű közeli infravörös kamerája is készített méréseket róla (1. ábra), amelyek az elvárásoknak megfelelően részletességükben

és minőségükben felülmúlnak minden eddigi felvételt erről az objektumról [1]. A kutatók a JWST új felvételei alapján kimutatták a szupernóva lökéshullámának nyomainak az említett gyűrűnél távolabbi régiókban is, amelyekben az idő múlásával szintén megjelenhetnek majd forró, fényes csomósodások. Szintén az új mérések segítségével sikerült a belső gyűrűben is új struktúrákat kimutatni: a gyűrűn belül, ahol a gáz- és poranyag egy kulcslyuk alakú anyagfelhőbe rendeződik, két, a Hold sarlójához hasonló, fényes körív is megjelenik. Ezek a körívek az elméletek szerint a felrobbanó csillag levett, külső burkaiból származhatnak. Az új felfedezések mellett a kutatók egy következő célt is megfogalmaztak az SN1987A-val kapcsolatban, mégpedig azt, hogy a JWST segítségével szeretnék kimutatni a szülőobjektumként szolgáló kék óriáscsillag felrobbanása után valószínűsíthetően visszamaradt neutroncsillagot, amelyről napjainkig más műszerek még nem alkottak képet.

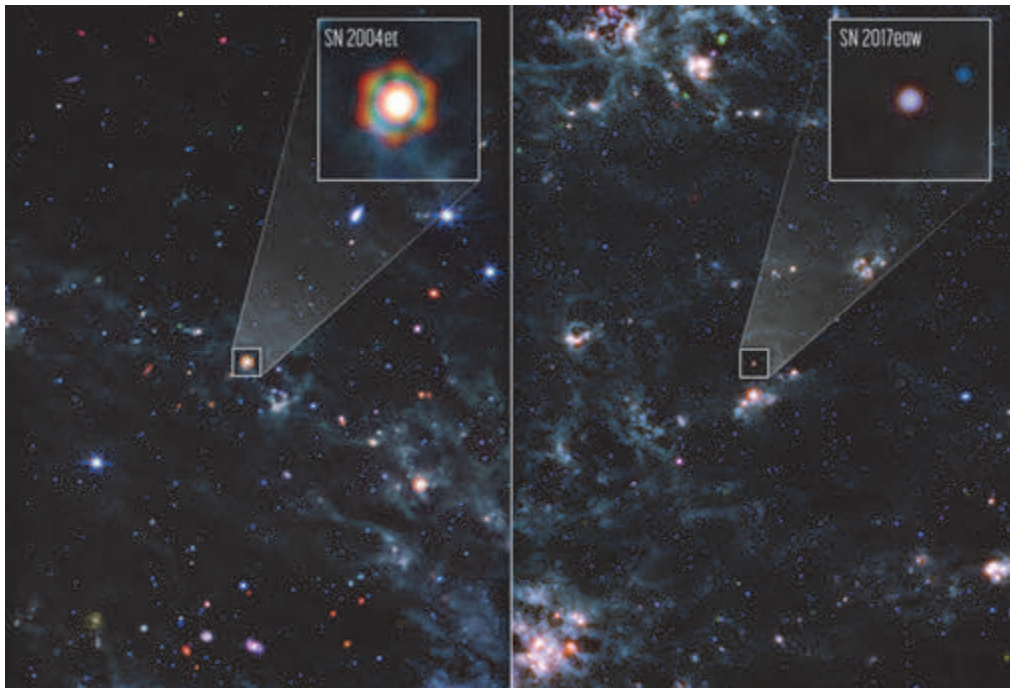


1. ábra: A JWST hamisszínes felvétele az SN1987A szupernóva-maradványról. [Forrás: NASA, ESA, CSA, Mikako Matsuura (Cardiff University), Richard Arendt (NASA GSFC, UMBC), Claes Fransson (Stockholm University), Josefin Larsson (KTH), képfeldolgozás: Alyssa Pagan (STScI)]

Szupernóvák a Tűzijáték-galaxisban

Az SN2017eaw és az SN2004et elnevezésű szupernóvák szintén a nagy részletességgel vizsgált, különlegesnek tekintett csillagrobbanások sorát gazdagítják, hiszen mindkettő egy közeli galaxisban, az NGC 6946 katalógusszámmal ellátott Tűzijáték-galaxisban robbant. Ezért ezt a két objektumot a szaknyelvben testvérszupernóváknak nevezik.. Maga a galaxis is onnan kapta a tűzijáték elnevezést, hogy napjainkig több, igen látványos szupernóva-robbanásnak adott otthont.

Ezért hát ez a két objektum érdekes célpontként gazdagította a James Webb-űrtávcsővel vizsgálandó égitestek sorát (2. ábra). A két szupernóváról készített mérések elemzésében részt vett egy magyar kutatócsoport is, Szalai Tamás (Szegedi Tudományegyetem) vezetésével. A csoport fő célja a szupernóva-robbanások során keletkező csillagközi por mennyiségének, kiterjedésének és egyéb fizikai tulajdonságainak becslése volt. A csillagközi por ugyanis kiemelkedően fontos szerepet játszik a csillagok keletkezésének folyamatában, eredete azonban napjainkig vitatott. A legelfogadottabb elmélet szerint a csillagközi port jórészt a felrobbanó csillagok környezetében lejátszódó folyamatok hozzák létre, éppen ezért az SN2017eaw és az SN2004et, mint közeli szupernóva-robbanások, jelentősek lehetnek a porképződés szempontjából is. A kutatócsoport modellezéssel kimutatta, hogy az SN2004et szupernóva robbanása során kiemelkedően sok por képződött: eddig csak az SN1987A esetén adódott ennél nagyobb mennyiség [2].



2. ábra: A JWST felvétele a Tűzijáték-galaxisban felrobbant, SN2004et és SN2017eaw nevű szupernóvákról. [Forrás: NASA, ESA, CSA, Ori Fox (STScI), Melissa Shahbandeh (STScI), Alyssa Pagan (STScI)]

Az SN1980K nevű szupernóva a fentebb bemutatott két objektum mellett szintén a Tűzijáték-galaxisban robbant fel, és egy szerencsés véletlen folytán a James Webb-űrtávcsőnek az SN2004et-ről készített képein is megjelent. Ilyen módon a kutatóknak alkalmuk nyílt megvizsgálni a porképződést ennek a robbanásnak a környezetében is, amelynek során érdekes jelenségekre bukkantak. Az SN1980K körül ugyanis az SN1987A porgyűrűjénél nagyságrendekkel több por képződésére utaló jeleket azonosítottak, amiből arra következtettek, hogy az objektum körül egy porból álló szupergyűrű lehet jelen [3].

JWST-felvétel a Rák-ködről

A James Webb-űrtávcső célpontjai között távcsőidőt kapott az egyik legismertebb szupernóva-maradvány, a Messier-katalógus M1-es számmal jelölt objektuma is, amelynek a köznyelvben is elterjedt elnevezése a Rák-köd. A látványos és hatalmas, csaknem 10 fényévnyi kiterjedésű, táguló gázködöt (3. ábra) az 1054-ben, a Rák csillagképben felrobbant szupernóva hozta létre. A szupernóvát, mint az ég-



3. ábra: A Rák-köd a JWST infravörös kamerájának szemével. (Forrás: NASA / JPL-Caltech)

bolton hirtelen megjelenő, szabad szemmel is feltűnő fénypontot az akkori kínai csillagászok észlelték először, majd később európaiak is készítettek róla feljegyzést.

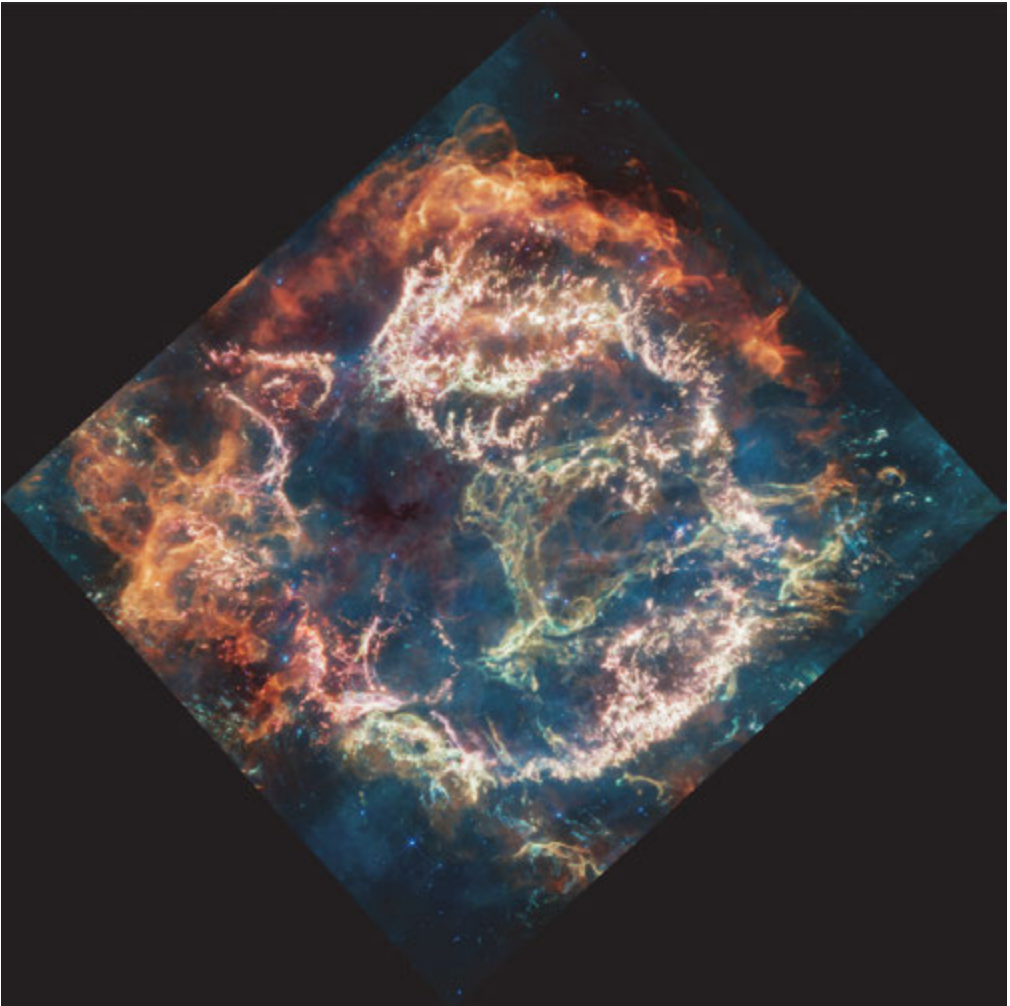
Mivel a Rák-köd dinamikusan és folyamatosan változó alakja napjainkban is rendkívüli figyelmet kap a csillagászatban, illetve a szupernóva-kutatásban, szinte magától értetődő, hogy a JWST is készített róla méréseket [4]. A kutatók célja ezekkel az új, és minden eddiginél részletesebb felvételekkel az volt, hogy még jobban megismerjék az 1054-ben felrobbanó szülőcsillag összetételét, a benne lejátszódó fizikai folyamatokat, illetve mintavételezzék a robbanás során keletkezett új elemeket. Az elvárásoknak megfelelően a JWST mérései alapján sikerült is eddig szemeink előtt láthatatlan, új részleteket azonosítani a Rák-köd központi régiójában, ahol egy gyorsan forgó, erős mágneses terű neutroncsillag, egy úgynevezett pulzár van jelen. A pulzárok pólusaiból a mágneses tér által a fénysebességhez közeli sebességre gyorsított töltött részecskék hagyják el az objektumot, szinkrotronsugárzást bocsátva ki. Ezt a sugárnyalábot a szaknyelv jetnek nevezi. Ez a kifúvás, illetve a központi neutroncsillag alakja a Rák-ködről készült új JWST-képeken tehát szenzációs módon láthatóvá vált.

Új részletek feltárása a Cassiopeia A szupernóva-maradványról

Az égbolt legfényesebb rádióforrása a Cassiopeia csillagképben található Cassiopeia A elnevezésű szupernóva-maradvány. Mivel az objektum a Tejútrendszeren belül helyezkedik el, a legközelebbi, és ilyen módon különlegesen nagy részletességgel vizsgált szupernóva-maradványok közé tartozik. Magáról a csillagrobbanásról nem tesznek említést a korabeli krónikák, így ha az akkori csillagászok meg is figyelték a szupernóvát, feljegyzéseik a feledés homályába veszttek. A mai napig rejtélyes, hogy egy ilyen horderejű eseménynek vajon miért nem maradt vissza írásos nyoma. A robbanás maradványa, egy táguló gázfelhő azonban jól megfigyelhető napjaink égboltján az elektromágneses spektrum különböző hullámhosszain. A gázfelhő méretéből, illetve tágulási sebességéből a kutatók arra a következtetésre jutottak, hogy a maradványt egy nagy tömegű csillag robbanása hozhatta létre, körülbelül 1667-ben. Az elméletek szerint a felrobbanó csillag először lefújta külső hidrogénburkát csillagszél formájában, majd a robbanás lökéshulláma kölcsönhatásba lépett ezzel az anyaggal, és ennek következtében felfényesedett.

A James Webb-űrtávcsővel végzett méréseknek az esztétikus felvétel (4. ábra) készítése mellett tudományos céljai is voltak: a Cassiopeia A maradvány vizsgálatából következtetéseket lehet levonni arra vonatkozóan, hogy milyen típusú csillag robbant fel, a robbanás során milyen elemek keletkeztek, illetve mennyi, és milyen hőmérsékletű por jött létre. A JWST által készített képen jól látszik egyfajta szálak szerkezet, amelyet a szülőcsillag a robbanás során fújt le magáról. Egy ilyen nagy energiájú folyamatban új, nehezebb elemek is keletkeznek magfúzióval, s ennek nyomai szintén megfigyelhetők a szálakban oxigén, neon és argon formájában.

Az új mérések a szupernóva, illetve környezetének vizsgálatán túl betekintést engednek a csillagközi por képződésének és dinamikájának fizikai folyamataiba. A csillagközi por pedig kiemelt szerepet játszik az új csillagok keletkezésében, hiszen maguk a csillagok – akár korábbi szupernóva-robbanások során kialakuló – hideg porfelhők sűrűsödésével jönnek létre [5].

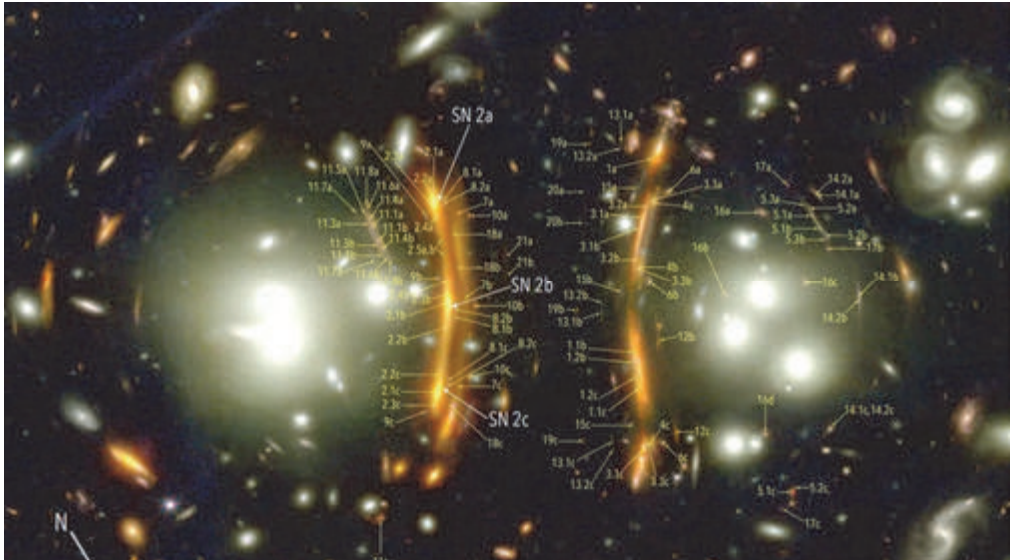


4. ábra: A Cassiopeia csillagképben található Cassiopeia A szupernóva-maradvány, ahogy a JWST látta. [Forrás: NASA, ESA, CSA, D. Milisavljevic (Purdue), T. Temim (Princeton), I. De Looze (Ghent University), képfeldolgozás: J. DePasquale (STScI)]

SN H0pe: a legtávolabbi szupernóvák egyike

A JWST felvételei egy rendkívüli objektum felfedezését tették lehetővé: ez az SN H0pe nevű, Ia típusú szupernóva, amely a máig felfedezett szupernóvák közül a második legtávolabbi (5. ábra). Az Ia típusú szupernóva-robbanások szülőobjektumai olyan fehér törpecsillagok, amelyek a Chandrasekhar-határtömeget (kb. 1,45 naptömeg) elérve elveszítik stabilitásukat, és egy hatalmas energiamennyiséget felszabadító, termonukleáris robbanás formájában végleg megsemmisülnek. Ezek a szupernóvák az Univerzum

legfényesebb jelenségei közé tartoznak, így igen nagy távolságokban is megfigyelhetők. A kozmológiában ezért gyakran használatosak a távolságmérés standard gyertyáiként, illetve lehetővé tették azt a Nobel-díjas felfedezést is, amelynek során bizonyítást nyert, hogy a Világegyetem gyorsulva tágul.



5. ábra: A távoli SN H0pe szupernóva gravitációs lencsézés miatt háromszorosnak látszó képe. A komponenseket az SN 2a, SN 2b, illetve SN 2c felirat jelzi. Forrás: [6]

Az SN H0pe nevű szupernóvát 2023 márciusában azonosították először a JWST képein. Maga a detektálás szintén egy szenzációsan ritka jelenséget vetített szemeink elé: ez a szupernóva ugyanis a felvételeken nem egy, hanem egyszerre három példányban jelent meg [6]! Ezt az úgynevezett gravitációs lencsehatás tette lehetővé. A gravitációs lencsézés lényege Einstein általános relativitáselméletében gyökerezik, amely szerint a nagy tömeggel rendelkező testek meghajlítják a téridő szövetét. A meghajlított téridőn áthaladó fény pedig szintén meghajlik. Ilyen módon ha egy távoli objektum (esetünkben az SN H0pe szupernóva) fényét meghajlítja egy a megfigyelő és a szupernóva közötti nagy tömegű égitest (például egy galaxis), akkor megtörténhet, hogy a szupernóva fénye felerősítve, sokszorozódva jelenik meg detektorainkon.

Amellett tehát, hogy a szupernóvának már csak a detektálása is tudományos szenzációnak számít, az SN H0pe értékes kozmológiai tesztobjektumnak is minősül, hiszen segítségével pontosítható az Univerzum tágulásának ütemét jellemző Hubble-paraméter. Ennek meghatározására több különböző módszer létezik. Értéke az Ia típusú szupernóvaikon túl a galaxisok távolodási sebességéből, illetve kozmikus mikrohullámú háttérsugárzás tulajdonságainak segítségével is becsülhető. A különböző módszerekből azonban nem teljesen adódik egyezés a Hubble-paraméterre, így az érték pontosításához további számolások szükségesek, amelyekhez fontos, hogy az Univerzum minél több, az SN H0pe-hoz hasonlóan távoli objektumáról készüljenek mérések.

Mi történik a szupernóvává válás előtt, avagy mérések a Wolf-Rayet 124-ről

A JWST sikeresen megörökítette a Wolf-Rayet 124 (WR124, 6. ábra) jelölésű csillagot, amelynek segítségével a kutatók megvizsgálhatják, mi történik azelőtt, hogy az objektum egy óriási szupernóva-robbanással befejezi az életét. A Wolf-Rayet-csillagok különlegesen forró, és rendkívül nagy kezdeti tömegű csillagok, amelyekre jellemző, hogy nagy sebességű csillagszelek formájában anyaguknak akár az egy-negyedét is elveszíthetik. Az ilyen nagy tömegű csillagok élettartama a kisebb tömegűekéhez képest nagyon rövid, hiszen a gyors magfúzióval hamar végére járnak anyaguknak. A Wolf-Rayet-csillagok tehát körülbelül 1 millió évet felölölő életük után magkollapszusos szupernóva-robbanással érnek vé-



6. ábra: A James Webb-űrtávcső felvétele a WR124-ről. A forró, fiatal csillag a kép közepén látszik. (Forrás: NASA, ESA, CSA, STScI, Webb ERO Production Team)

get. (Ezzel szemben Napunk életciklusa nagyjából 10 milliárd évet ölel fel.) Érdemes tehát a Wolf-Rayet 124-hez hasonló csillagokat vizsgálni, hiszen tanúskodnak a szupernóva-robbanást megelőző állapotról, illetve segítségükkel választ kaphatunk arra a kérdésre, hogy hogyan jutottak nehéz elemek a csillagközi térbe az első csillagok kialakulásának idején.

A Wolf-Rayet 124 egy másik szempontból is kiváló célpontja volt a James Webb-űrtávcsőnek. Az ilyen típusú csillagok körül ugyanis nagy mennyiségű csillagközi por gyűlik össze, hiszen a csillagszél formájában lefújt anyag egy idő után kihűl, így lehetővé téve a porszemcsék kondenzációját. Az optikai tartományban a por jelenléte olyan nagymértékű fényelnyelést okoz, hogy a Wolf-Rayet-csillagok környezetét érdemes inkább a hidegebb régiók mintavételezésére alkalmas infravörös tartományban mintavételezni, amely tartományban maga a JWST is működik.

Irodalomjegyzék

- [1] Larsson J. et al. (2023): *JWST NIRSpec Observations of Supernova 1987A - From the Inner Ejecta to the Reverse Shock*. *Astrophysical Journal Letters*, 949, L27
- [2] Shahbandeh M., ... , Szalai T. et al. (2023): *JWST observations of dust reservoirs in type IIP supernovae 2004et and 2017eaw*. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 523, 6048
- [3] Zsíros Sz., Szalai T. et al. (2024): *Serendipitous detection of the dusty Type IIL SN 1980K with JWST/MIRI*. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 529, 155
- [4] Temim T. et al. (2021): *The Origin of the Crab Nebula*. *JWST Proposal, Cycle 1, #1714*
- [5] Milisavljevic D. (2023): *Understanding Supernovae Via Their Remnants in the Era of JWST*. *Bulletin of the American Astronomical Society*, 55, 2023n2i225p04
- [6] Frye B.L. et al. (2024): *The JWST Discovery of the Triply Imaged Type Ia „Supernova H0pe” and Observations of the Galaxy Cluster PLCK G165.7+67.0*. *Astrophysical Journal*, 961, 171

A mikro és a giga szimbiózisa – Tíz éve működik a Gaia asztrometriai űrszonda

Szabados László

HUN-REN
Csillagászati és
Földtudományi
Kutatóközpont
Konkoly Thege Miklós
Csillagászati Intézet,
Budapest

Az Európai Űrgynökség (ESA) Gaia küldetésének célja, hogy három dimenzióban feltérképezze galaxisunkat, a Tejútrendszert, és közben feltárja a galaxis összetételét, kialakulását és fejlődéstörténetét. A Gaia példátlan pontosságú pozíció- és radiálsebesség-méréseket végez a galaxisunkban és a közeli extragalaxisokban található több mint 1,8 milliárd csillag térbeli helyzetének és mozgásának megállapítására. Az űrszonda műszerei mindent megmérnek, aminek a fénye a detektoraira esik, így a még észlelhető leghalványabb kozmikus források fényessége majdnem 21 magnitúdó.

Az elérhető pozíciómérési pontosság persze függ a mérendő objektum fényességétől, de a fényes csillagokra néhány milliomod ívmásodperc is lehet. A címben szereplő mikro erre utal, a giga pedig a mért objektumok számára.

A 2013 decemberében indított űrszonda a Nap-Föld-rendszer L_2 -vel jelölt második Lagrange-pontja körül ún. halópályán kering, a Földtől kb. másfél millió kilométerre, és a Naptól 45° -os szögtávolságig képes megfigyelni. A tíz évvel ezelőtt, 2014 közepén kezdődött tudományos program tulajdonképpen folytatása a csillagok helyét és mozgását rendkívül pontosan meghatározó, ugyancsak az ESA által készített legelső asztrometriai űrszonda, a Hipparcos negyedszázaddal ezelőtti felmérésének. A Gaia megfigyelési stratégiája, a teljes égbolt sokszori letapogatása nemcsak azt teszi lehetővé, hogy közel kétmilliárd csillagot – galaxisunk, a Tejútrendszer csillagainak nagyjából 1%-át – térképezzen fel, hanem azt is, hogy exobolygókat, barna törpéket, távoli szupernóvákat, aktív galaxisokat, kvazárokat, valamint a Naprendszerünkben található kisbolygókat is észleljen, illetve újabbakat fedezzen fel (1. ábra).

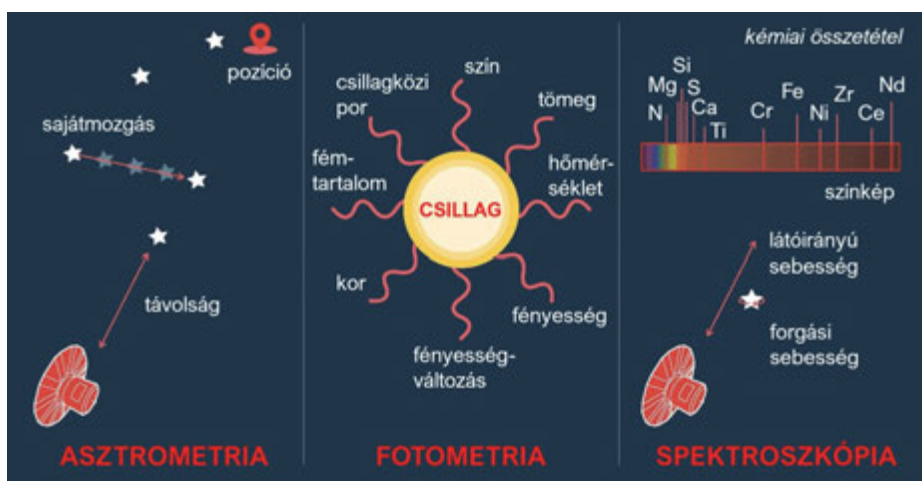
A földi légkörön kívül működő műszerekkel végzett asztrometriai mérések fontosságáról, előnyeiről, továbbá a Hipparcos eredményeiről, illetve a Hipparcos és a Gaia összehasonlításáról a Tisztelt Olvasó részletesebben tájékozódhat két 2020-ban megjelent cikkemből [1,2], magáról a Gaia űrszondáról,



1. ábra: A Gaia működésének tízéves évfordulója alkalmából készített logó.
(Forrás: ESA Gaia)

felépítéséről, az általa végzett mérésekről és az adatok feldolgozásáról pedig a Marschalkó-Szabados szerzőpáros 2014-es tanulmányából [3].

Az 1989 és 1993 között működött Hipparcos utódjaként számon tartott Gaia sok tekintetben túltesz az elődjén: míg a Hipparcos „csak” valamivel több mint 100 000 csillagról végzett kb. 0,001 ívmásodperc pontosságú pozíciómérést, a Gaia mérési programján négy nagyságrenddel több objektum szerepel (nemcsak csillagok), és azok pozíciómeghatározási pontossága legalább százszor jobb, mint a Hipparcos által mért csillagoké. A sokszori pozíciómérésekből ki lehet számítani az adott forrás pontos koordinátáit, sajátmozgásának a két koordinátaírány menti komponensét, valamint a trigonometrikus parallaxisát, amiből megállapítható a távolsága. A Gaia esetében a térbeli mozgás harmadik komponense is meghatározható a látóirányú sebesség méréseiből. Ehhez persze színekpi információra is szükség van, de a Gaia műszerezettsége ezt is lehetővé teszi (2. ábra).



2. ábra: A Gaia méréseiből meghatározható asztrometriai és asztrofizikai adatok. (Forrás: ESA Gaia)

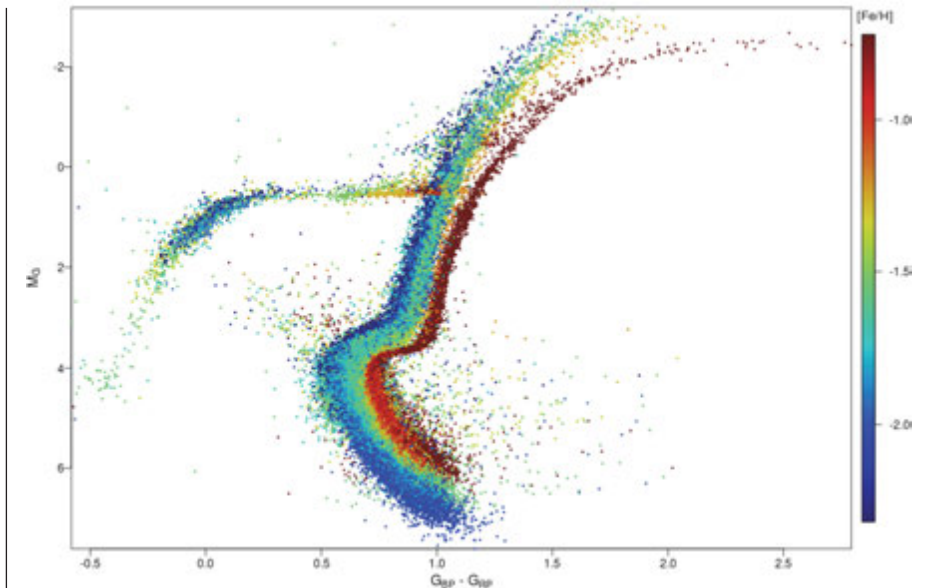
A Gaia a szögmérés mellett spektrofotometriai adatokat is szolgáltat, és az általa szűk színekptartományban készített spektrumokból számos asztrofizikai információ is kinyerhető (2. ábra). A fényesség értékét a széles színekptartományban kapott jel alapján G magnitúdóban határozzák meg, a színindexet pedig a vörös és a kék színekptartomány alapján G_{RP} és G_{BP} magnitúdóban (red photometry, ill. blue photometry). A térbeli helyzet és mozgás mellett így megállapítható a csillagok hőmérséklete, fémtartalma, kora, esetleges fényességváltozása, és a látóirányú csillagközi fényelnyelés mértéke is.

A szonda indításakor 5 évig tartó küldetésre számítottak, és miután a Gaia kifogástalan működése során már 2019-ben teljesítette ezt az előirányzott időtartamot, az ESA a működés támogatását többször is meghosszabbította. A Gaia mérési programja várhatóan 2025 elején fejeződik be, a szonda helyzetének időnként szükséges korrigálására szolgáló segédtrakéták üzemanyagának elfogyásával.

Tudományos célok

A Gaia asztrometriai űrszonda küldetésének egyik fő célja olyan adatok gyűjtése, amelyek lehetővé teszik Galaxisunk szerkezetének és fejlődésének tanulmányozását. A szonda az egész égboltot átvizsgálva feltérképezi a határmagnitúdónál fényesebb összes objektum helyzetét és mozgását mindhárom térbeli dimenzióban. Egy csillag háromdimenziós sebességét úgy határozzák meg, hogy az égbolton megfigyelt mozgását, az ún. sajátmozgást kombinálják a csillag mért spektrumából – a színképvonalak észlelt hullámhosszának a Doppler-effektus alapján – származtatott radiális sebességével és a trigonometrikus parallaxisból kapott távolsággal.

A galaxisbeli csillagkeletkezés története a csillagok jelenleg megfigyelt populációjából a csillagtípusok (szín és fényesség) szerinti eloszlásuk meghatározásával állapítható meg. Egy csillag színe a csillag felszíni hőmérsékletétől függ. A fényerősség (luminozitás, fényteltjesítmény) és a szín egyaránt változik a csillag akár több milliárd évig tartó élete során, ahogyan a csillag különböző fejlődési szakaszokon megy keresztül. A szín-fényesség vagy az azzal egyenértékű Hertzsprung–Russell-diagramon (HR-diagramon) ábrázolva a csillag helyét, az elárulja a csillagfejlődési állapotát, beleértve a korát is (3. ábra).



3. ábra: A gömbhalmazok egyesített Hertzsprung–Russell-diagramján szembevető a színindex és a luminozitás fémtartalomfüggése. A jobb oldali színskálán felfelé haladva nő a nehéz elemek (a csillagászatban „fémek”) gyakorisága [4]

A csillagok sebességének és helyzetének pontos ismerete lehetővé teszi a struktúrák azonosítását, és betekintést nyújt a gravitációs kölcsönhatások által vezérelt galaktikus dinamikába, beleértve a

kisebb kísérőgalaxisok Tejútrendszerbe olvadását is. Galaxisunk csillagkeletkezési története pedig a csillagok csillagtípusok szerinti jelenlegi eloszlása alapján állapítható meg.

A Gaia mérései olyan kérdések megválaszolásához nyújtanak majd segítséget, mint például:

- Milyen sorrendben alakultak ki a Tejútrendszer fő szerkezeti elemei (dudor, korong, haló)?
- Van-e sugárirányú életkori gradiens az idősebb csillagok eloszlásában?
- Viszonylag egyenletes vagy erősen epizodikus a csillagkeletkezés története?
- Vajon a nagy galaxisok sok kisebb rendszer egyesüléséből alakulnak-e ki, amelyekben már megindult a csillagkeletkezés?

Csillagok, csillagfejlődés

Bár a csillagfejlődés alapelvei jól ismertek, a csillagok fejlődésének és belső szerkezetének számos olyan aspektusa van, amelyekkel kapcsolatban a jelenlegi elméletek továbbfejlesztésre szorulnak. Egy csillag élete során a felszíni hőmérséklete és luminozitása annak megfelelően változik, ahogyan a csillag energiaforrása, a könnyű elemek fúziója a magban és az azt körülvevő héjakban halad előre. A csillagfejlődés során a HR-diagramon egy görbe vonal mentén halad a csillag.

A Gaia méréseiből a csillagok fényessége, felszíni hőmérséklete, tömege, a felszínére jellemző kémiai elemgyakoriság és a csillagközi anyag általi fényelnyelés mértéke egyaránt pontosan megállapítható.

A Gaia által vizsgált különböző típusú csillagok nagy mintájára vonatkozó adatok nagymértékben elősegítik a csillagok szerkezetének és fejlődésének megértését, és lehetővé teszik a csillagok belsejére vonatkozó elméleti modellek továbbfejlesztését is, például a következő területeken:

- a konvektív magok mérete (a mag mérete határozza meg a csillag energiatermelésének fenntartásához rendelkezésre álló nukleáris üzemanyag mennyiségét);
- a kémiai elemek diffúziója a csillag belsejében (az elemek diffúziója során a hélium a magba kerülhet, ami növeli a szénné alakítható hélium mennyiségét, és meghosszabbítja a csillag által a fejlődési szakaszban eltöltött időt);
- konvekció a külső rétegekben.

Fehér törpék

A kis tömegű – kezdetben legfeljebb 8 naptömegnyi anyagból álló – csillagok fehér törpeként végzik. Ebben az állapotban a csillag belsejében már nincs energiatermelés magfúzióval, mivel a hőmérséklet nem nő elég magasra ahhoz, hogy az egymást követő elemek fúziójának következő lépése beindulhasson. A csillagmag összeomlik, a csillag külső rétegei pedig ledobódnak, néhány évtizedig megfigyelhető planetáris ködöt létrehozva. A csillag gravitációs összeomlását már nem a sugárnyomás, hanem az elektronok elfajulási nyomása akadályozza meg, egy nagyon kompakt fehér törpét eredményezve. A mag kémiai összetétele a csillag kezdeti tömegétől függ, mivel ez határozza meg, hogy a csillag a mag végső összeomlása előtt az elemek fúziójának melyik szintjére juthat el. A legtöbb fehér törpe főleg teljesen ionizált szénből és oxigénből áll.

Mivel a fehér törpék már nem termelnek energiát, fejlődésük főként lehűléssel zajlik, amelynek során több tízmilliárd év nagyságrendű időszak alatt leadják maradék energiájukat, és fényességük folyamatosan csökken. A hűlés során a mag anyaga belülről kifelé kristályosodik, kompakt szerkezetet alkotva.

A Gaia fehér törpékre vonatkozó megfigyelései jelentősen előremozdítják e kompakt objektumok tanulmányozását:

- pontosítani lehet a tömeg és a sugár közötti kapcsolatot;
- az elméleti modellek és a kettős rendszerekben lévő fehér törpék megfigyelt tulajdonságainak összehasonlításával a Gaia mérési adataiból meg lehet határozni a csillag külső rétegeinek leválása előtti tömege és az így keletkező fehér törpe tömege közötti kapcsolatot;
- a Nap közelében lévő fehér törpék (a 10 parszeknél közelebbi csillagok ~5%-át teszik ki) megfigyelése lehetővé teszi a Nap környezete korának pontos meghatározását, a fehér törpék hűlési idejéből származtatva.

Változócsillagok

A Gaia fotometriai és asztrometriai műszerei a 320–1000 nm közötti hullámhossztartományban több sávban végeznek méréseket minden 20,8 magnitúdónál fényesebb forrásról. Egy-egy forrás észlelésének száma az égbolton elfoglalt helyétől függ, de az első öt évben átlagosan 70 fotometriai mérés készült egy objektumról, és ez a szám a megfigyelési program végére meg is duplázódhat. A mérések alapján azonosítani lehet a változó fényességű forrásokat. Ezek között vannak egészen rövid (másodperces) és hosszú (több éves) időskálán zajló fényességváltozások.

A korábban működött Hipparcos asztrometriai űrszonda fényességmérései alapján a programcsillagok közül minden tizedik változócsillagnak bizonyult. Ezt az arányt általánosítva a Gaia programjának befejeztével akár 200 millióra is nőhet az ismert változócsillagok száma. A változó fényű objektumok legkülönbözőbb típusai – amelyek a csillagfejlődés különböző fázisait képviselik – is alaposan vizsgálhatók lesznek a rendelkezésre álló adatok alapján.

A Gaia méréseiből azonosított változócsillagok teljes mintája lehetővé teszi e különleges – vagy talán nem is annyira különleges, viszont mindenképpen fontos – objektumok gyakoriságának meghatározását. Lényeges eredményként várható, hogy a pulzáló változócsillagok különféle típusaira érvényes periódus-luminozitás összefüggést sikerül pontosan kalibrálni. Ezek az összefüggések – különösen a cefeidákra vonatkozók – ugyanis a kozmikus távolságskála alappillérei. A fedési változócsillagok esetében a komponensek fizikai jellemzői és a pályaelemek meghatározása nyújt értékes asztrofizikai információt. Összességében azonban több tucat különféle típusú változócsillagra vonatkozóan bővülnek ismereteink.

Naprendszerbeli kisbolygók és földközeli objektumok

A Gaia által észlelt források között természetesen naprendszerbeli égitestek is vannak, legnagyobb számban kisbolygók. A Gaia előnye a naprendszerbeli kis égitestek keresésében a földi megfigyelé-

sekkel szemben az, hogy az egész égboltot átvizsgálja. A földi észlelések az ekliptika körüli keskeny sávra korlátozódnak, és elkerülik az ekliptikának a galaktikus fősíkot keresztező területeit is. Ezek a korlátozások megakadályozzák a nagy hajlásszögű pályákon keringő kis égitestek és a Tejútrendszer síkjában lévő égitestek észlelését, de a Gaia esetében ez nincs így. Az, hogy a Gaia a Földtől 1,5 millió km-re kering a Nap körül, lehetővé teszi a Földtől beljebb keringő kis égitestek felfedezését is. Ezt a régiót a nappali fény miatt a Földről nem lehet megfigyelni. Az egész ég feltérképezése pedig lehetővé teszi az ekliptikától távoli pályákon keringő objektumok felfedezését is. Mivel a Gaia képes halvány és gyorsan mozgó objektumok észlelésére, több ezer földközeli objektumot (NEO-t) is észlel. Ezek azok a kis égitestek, amelyeket a nagybolygók gravitációs hatása olyan pályára taszított, hogy a Föld szomszédságába kerülnek.

A Gaia megfigyeléseiből a kisbolygók pályáját korábban elérhetetlen pontossággal lehet meghatározni. Az óriási adatbázis alapján finomítható a kis égitestek osztályozása, és feltárható az aszteroidák, a NEO-k és a meteoritok közötti rokonság is. Emellett ezen égitestek fizikai jellemzőinek a Naptól való távolságtól való függése is vizsgálható. Az észlelt kis égitestek 10–20%-ának kísérője lehet, és a Gaia méréseiből ki lehet mutatni a kettősséget, sőt a kettősök pályája is meghatározható, ami a komponensek tömegének kiszámítását is lehetővé teszi.

Perturbációk az Oort-felhőben

Messze a külső bolygókon túl, a Naptól néhány ezer csillagászati egység (CSE) és 150 000 CSE (~2,4 fényév) közötti távolságban a Naprendszer egy nagy üstökösfelhő, az ún. Oort-felhő veszi körül. Ezt a felhőt közvetlenül nem figyelték meg, de létezésére a 200 évnél hosszabb keringési periódusú üstökösök megfigyelései utalnak. A modellek szerint ahhoz, hogy ma is létezzenek hosszú periódusú üstökösök, szükség van a pótlásukra, mivel különben a Naprendszer 4,5 milliárd éves élettartamánál jóval rövidebb idő alatt eltűntek volna. A hosszú periódusú üstökösök megfigyelt pályája alapján nincs kitüntetett irány, ahonnan ezek a kométák érkeznek, ezért a forrásuk eloszlása is izotróp: egy gömb alakú térség.

Az üstökőspályáknak azonban vannak nem véletlenszerű csoportosulásai, amelyek közelmúltbeli csillagátvonulások hatására jöhettek létre. A közel kerülő vagy akár az Oort-felhőn is áthaladó csillagok az üstökösöket a Naprendszer belseje felé téríthetik. A Gaia méréseiből meg lehet állapítani, hogy az elmúlt évmilliók során mely csillagok haladtak el egészen közel a Naprendszerhez, illetve a közeljövőben mely csillagok hatnak az Oort-felhőbeli kis égitestekre. A Nap szomszédságában lévő csillagok eloszlásának és mozgásának pontos számbavétele lehetővé teszi az Oort-felhővel való közeli találkozások gyakoriságának meghatározását.

Eddig több mint 700 000 aszteroidát azonosítottak a Naprendszerben – bár az előrejelzések szerint ennél jóval több várható –, amelyek mindegyike a Naprendszer keletkezésekor, a bolygók kialakulása-kor megmaradt törmelék. A Gaia működése végéig várhatóan több mint 350 000 ilyen időkapcsolat fog megfigyelni, értékes információkat szolgáltatva a Naprendszer kialakulásával kapcsolatos nyomokat kereső csillagászok számára.

Az aszteroidákat a térképezési folyamat során azonosítják. Mivel ezek az égitestek sokkal közelebb vannak a Földhöz, mint a csillagok, a Gaia felvételein mozognak a csillagokkal ellentétben, és gyakori eset, hogy valamely területről készült egyik pillanatfelvételen jelen vannak, majd a következőn eltűnnek. Minden olyan objektum, amelyet megfigyelnek, de a feldolgozó szoftver nem találja az adott területről korábban készült képeken, elvileg nem csillag, hanem naprendszerbeli égitest, nagyrészt kisbolygó.

Amikor a Gaia egy korábban ismeretlen aszteroidát talál, lényeges, hogy gyorsan elkezdjék nyomon követni az égitest mozgását az észlelés validálása és a kisbolygó pályájának és fizikai jellemzőinek meghatározása érdekében. A gyors követés igénye miatt hozták létre a *Gaia Follow-Up Network for Solar System Objects* (Gaia-FUN-SSO) hálózatot, hogy minél hamarabb, még kezelhető keresési területen keressék az objektumot, hogy földfelszíni távcsövekkel megerősítsék a Gaia felfedezését.

Exobolygók

Korábban alig néhány exobolygót fedeztek fel földi asztrometriai megfigyelésekkel, az ESA Hipparcos műholdja, a NASA és az ESA Hubble-űrteleszkópja és nagy földi távcsövek által szolgáltatott asztrometriai információkat pedig a radiális sebesség módszerével felfedezett bolygórendszerek pályameghatározásának finomítására használták.

A viszonylag fényes csillagok esetében 10 milliomod ívmásodperc körüli asztrometriai pontossággal néhány tízezer exobolygó kimutatása várható a Naptól kb. 1500 fényév távolságig, a bolygó által a gazdacsillag mozgásában okozott imbolygás kimérése alapján.

Az újonnan észlelt exobolygók nagy mintája pedig lehetővé teszi, hogy a csillagászok megvizsgálják, hogyan függenek a bolygók jellemzői és gyakorisága a gazdacsillag tulajdonságaitól, ezzel is elősegítve saját Naprendszerünk kialakulásának és fejlődésének tisztázását.

A Gaia már és majdan elérhető adatai

A Gaia mérései nem válnak azonnal nyilvánossá. Hosszú és alapos feldolgozási folyamatot követően nagyjából kétevente bocsátanak közre egy kellőképpen megbízhatónak ítélt gigantikus adathalmazt. Ahhoz, hogy a pozíciómérések során kapott szögkülönbségekből tudományos célokra is használható adatok legyenek, igencsak bonyolult és hosszadalmas feldolgozó munka szükséges. Ezt a tevékenységet a Gaia Adatfeldolgozó és -Elemző Konzorciumban (DPAC) közreműködő több száz kutató – köztük magyar csillagászok – és szoftverfejlesztő végzi.

Az első adatkiadás (*Gaia Data Release 1*, DR1) 2016 szeptemberében történt a Gaia első 14 hónapban végzett megfigyelései alapján. A Gaia DR2-t 2018 áprilisában tették közzé, 22 hónap mérései alapján. A harmadik adatkiadás 34 hónapnyi mérési adatokon alapul, és két részre osztották: egy korai adatkiadás (Gaia EDR3) dátuma 2020. december, a teljesebb Gaia DR3 adatkiadás pedig 2022. június.

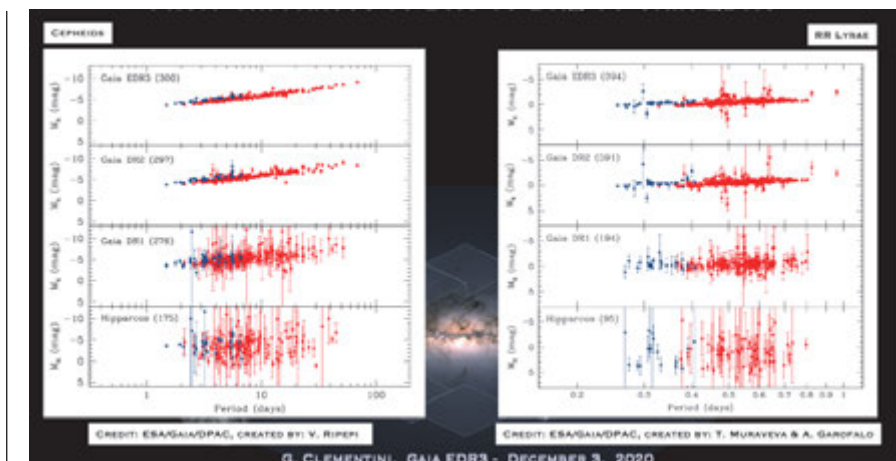
A nyilvánosságra hozott és a Gaia-archívumban (<https://gea.esac.esa.int/archive/>) elérhető adatok statisztikai összefoglalása az 1. táblázatban szerepel.

	<i>források a Gaia DR3-ban</i>	<i>források a Gaia DR2-ben</i>	<i>források a Gaia DR1-ben</i>
	1 811 709 771	1 692 919 135	1 142 679 769
referenciaepocha	J2016,0	J2015,5	J2015,0
az elemzett adatsor hossza (hónap)	34	22	14
legalább 5 asztrometriai paraméter	1 467 744 818	1 331 909 727	2 057 050
csak 2-paraméteres források (RA,D)	343 964 953	361 009 408	1 140 622 719
Gaia égi vonatkoztatási rendszerbeli (CRF) források száma	1 614 173	556 869	2 191
források száma <G> magnitúdóval	1 806 254 432	1 692 919 135	1 142 679 769
források száma G _{BP} fotometriával	1 542 033 472	1 381 964 755	-
források száma G _{RP} fotometriával	1 554 997 939	1 383 551 713	-
források radiális sebességgel	≈ 33 000 000	7 224 631	-
BP/RP színeképek	> 100 000 000	-	-
RVS színeképek	≈ 1 000 000	-	-
változó fényű objektumok	≈ 13 000 000	550 737	3 194
objektumok asztrofizikai jellemzőkkel	≈ 500 000 000	161 497 595	-
kettős és többes csillagok (pályaelemek)	néhány száz- ezer	-	-
galaxisok és kvazárok gazdagalaxisainak morfológiai jellemzése	néhány millió	-	-
naprendszerbeli objektumok (pályaelemek is)	≈ 150 000	14 099	-
Gaia Andromeda Fotometriai Felmérés (GAPS)	≈ 1 000 000	-	-

1. táblázat: Az eddigi adatközlések főbb jellemzői

Mivel a Gaia küldetés vezetői arra töreksenek, hogy nagyjából kétévente újabb adathalmazt tegyenek nyilvánossá, amikor kiderült, hogy az első öt évnél valamivel hosszabb mérési időszakot (66 hónapnyi adatot) feldolgozó Gaia DR4 csak 2026-ban válik elérhetővé, az illetékesek úgy döntöttek, hogy egy részleges adatkibocsátást is közbeiktatnak: ez lett a Gaia célzott adatközlés (*Gaia Focused Data Release*), 2023 októberében. Minden egyes adatközlésben az előzőeknél pontosabb adatok kerülnek nyilvánosságra a vizsgált csillagokról és más égitestekről – a Naprendszerből az extragalaxisokig. Az adatok pontosságának fokozódó javulását jól szemlélteti a 4. ábra, amelyen a klasszikus cefeidákra,

illetve az RR Lyrae típusú változócsillagokra vonatkozó periódus–luminositás összefüggések láthatók. Szembeötlő a pontokhoz illeszkedő egyenes szórásának lényeges csökkenése az egyre nagyobb adat-tömeg feldolgozásának eredményeként.

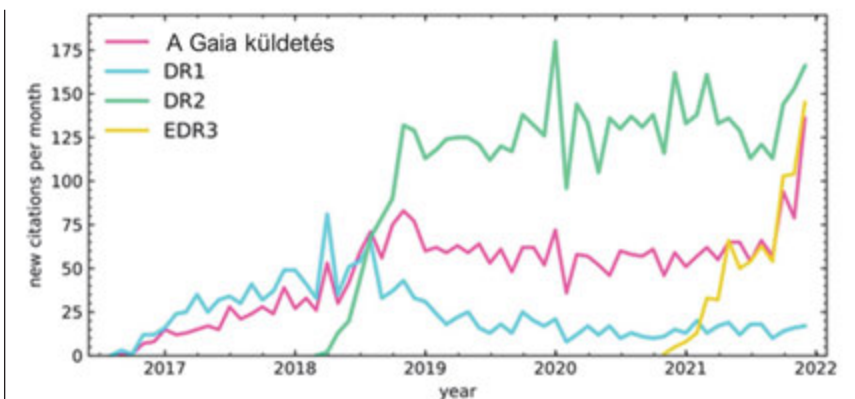


4. ábra: A klasszikus cefeidák (balra) és az RR Lyrae típusú változócsillagok (jobbra) periódusa és abszolút fényessége közötti összefüggések. Alulról felfelé a Hipparcos, a Gaia DR1, a Gaia DR2 és a Gaia EDR3 adatai alapján meghatározva. (Forrás: Gisella Clementini)

A Gaia végleges katalógusát 2030 körül fogják közzétenni, és ez a katalógus talán még évtizedekig központi szerepet játszik majd a csillagászat számos területén. Ezt a katalógust a Gaia összes mérése során kapott gigantikus adathalmaz összetett feldolgozási folyamata során állítják össze. A végleges katalógus közel kétmilliárd csillag teljes asztrometriai (égi koordináták, sajátmozgás és távolság) és fotometriai (fényesség és szín) adatait, valamint további információkat tartalmaz majd, beleértve a források osztályozását, valamint a változócsillagok, a több tagú csillagrendszerek és az exobolygók-nak otthont adó csillagok listáját. Több mint 150 millió csillag esetében a radiális sebességre vonatkozó idősor is elérhető lesz. A csillagokon kívül a naprendszerbeli égitestek és a távoli galaxisok mért adatai és jellemzői is szerepelnek majd. Ám erre még éveket kell várni, a tervek szerint ez a Gaia DR5 csak a 2030-as évek elejétől áll majd a csillagászközösség rendelkezésére.

Válogatás a Gaia eredményeiből

A Gaia mérései alapján született tudományos eredményeket lehetetlen röviden (de akár hosszan is) összefoglalni. Az űrszonda eredményességét jól mutatja az 5. ábra, amelyen a Gaia űrszondát és annak feladatait, illetve az egyes adatkiadásokat részletesen ismertető szakcikkre havonta megjelent hivatkozások száma látható. A Gaia méréseit használó kutatások eredményeit közlő szakcikk száma az utóbbi néhány évben már ezres nagyságrendű.



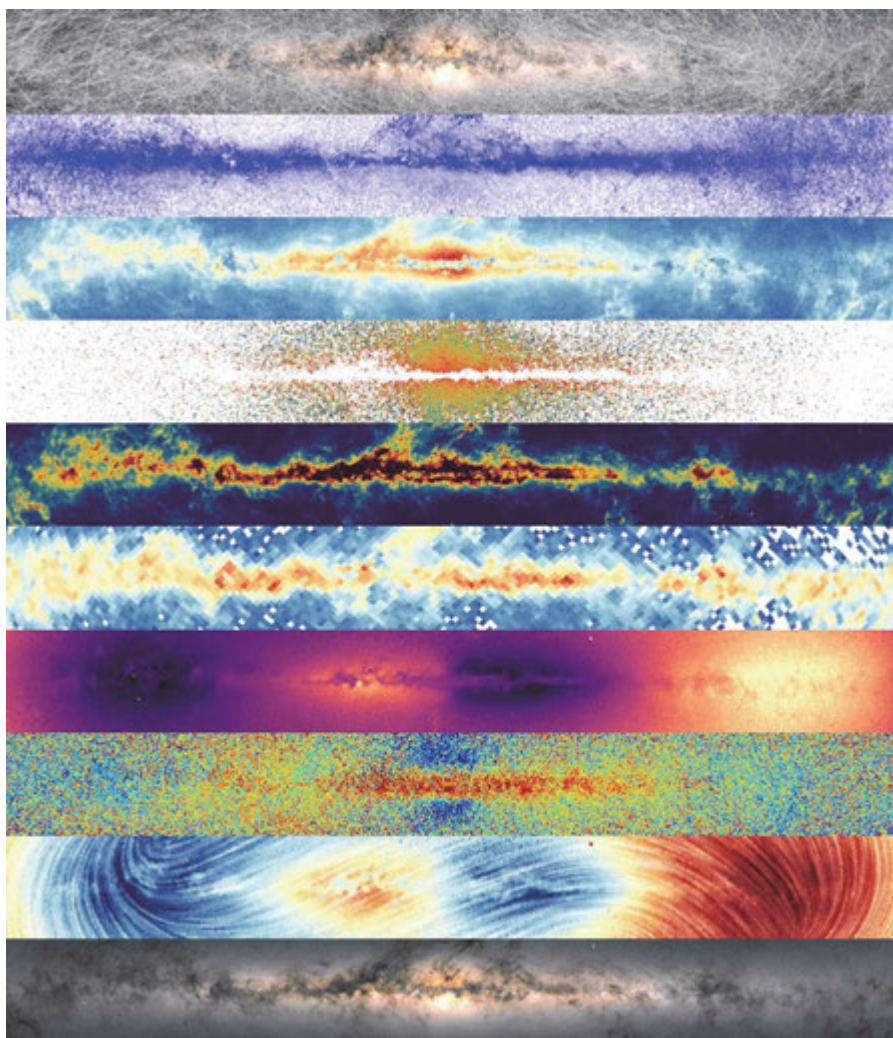
5. ábra: Havonkénti hivatkozások száma a Gaia küldetését összefoglaló közleményre, illetve az egyes adatközlések tartalmát leíró cikkekre [5]

Mivel a jelenleg szabadon elérhető adatok zöme még nem eléggé pontos – de majd az lesz a végleges Gaia-katalógusban –, az egyedi objektumokra vonatkozó használatuk során nem árt az óvatosság. Ezért is az a jellemző, hogy hasonló típusú objektumok csoportját, illetve egy konkrét égi tartományban levő nagy számú objektumot vizsgálva vonnak le következtetéseket a kutatók a Gaia adatai alapján. Ilyen kutatási eredmények szerepelnek például Bódi Attila és Kiss László 2019-es cikkében az RV Tauri típusú változócsillagok fizikai tulajdonságaival kapcsolatban [6], illetve Szilágyi Máté, Kun Mária és Ábrahám Péter (2021) tanulmányában a Cepheus fler csillagkeletkezési tartomány részletes vizsgálatáról [7].

Az eddig közzétett sok ezernyi szakcikkből szereplő eredmények közül talán a legnagyobb figyelmet az keltette, amely szerint a Tejútrendszer 8–10 milliárd évvel ezelőtt egy egész törpegalaxist kebelezett be. Erre a törpegalaxisra Gaia-Enceladus néven hivatkoznak a szakirodalomban. A csillagok mozgása és kémiai összetétele alapján az M2, M56, M75, M79 és még további három gömbhalmaz is egykor a Gaia-Enceladusból került a Tejútrendszerbe [8]. A Tejútrendszer fejlődését nagyban befolyásoló Gaia-Enceladuson kívül sok más közeli törpegalaxis gravitációja is hat galaxisunkra. Sok csillagáram törpegalaxisoknak a Tejútrendszerbe történt egykori behatolására utal.

A Gaia műszereivel még a Lokális csoport galaxisaiban levő – nem túl halvány – csillagok sajátmozgása is kimérhető. Így sikerült kimutatni az M31 (Andromeda-köd) és az M33 (Triangulum-köd) közötti gravitációs kölcsönhatást is. És ami igazán figyelemre méltó: amíg földi asztrometriai mérésekkel csak a Naprendszer közelében levő csillagok trigonometrikus parallaxisát lehet kimérni, a Gaia segítségével már más galaxisokban levő egyedi csillagok távolsága is közvetlenül megállapítható pusztán pozíció-mérésekből!

Számos olyan szakcikk jelent meg, amelyben újabb csillaghalmazok felfedezését közlik a Gaia mérései alapján. Erről a témáról kiváló összefoglaló olvasható Cantat-Gaudin (2022) cikkében [5]. A Tejútrendszer minél jobb megismerésére irányuló kutatások sokszínűségét, témagazdagságát igazán jól a 6. ábra szemlélteti.



6. ábra: Montázs a Tejútrendszer különféle szempontok szerint végzett vizsgálatairól – a Gaia DR3-ban közzé tett adatok alapján, galaktikus koordináta-rendszerben. Fentről lefelé: a csillagok mozgása az elkövetkező 400 000 évben; a csillagok kora (a kék szín a fiatalabb, a vörös az idősebb csillagokat jelzi); a csillagközi por elnyelésének mértéke különböző irányokban a radiálissebesség-spektrométerrel kapott színeképek alapján; az eddig azonosított 134 000 RR Lyrae típusú változócsillag eloszlása és nehézelem-tartalma (ez utóbbi a fénygörbe alakjából meghatározva); az egyedi csillagok extinkciója; a csillagközi anyag diffúz sávjainak erőssége; az egyedi csillagok látóirányú sebessége; a csillagok nehézelem-gyakorisága, a vörösebb szín a fémgazdagságot jelöli; a csillagok háromdimenziós sebességeloszlása; a csillagok valódi színének eloszlása. (Forrás: Tineke Roegiers, ESA / Gaia / DPAC – CC BY-SA 3.0 IGO)

Magyar közreműködés a Gaia küldetésben

E cikk szerzője már a Hipparcos asztrometriai űrszonda tudományos programjában is részt vett az általa benyújtott kutatási program – cefeida típusú változócsillagok lehetséges kísérőinek kimutatása – témavezetőjeként. Bár a Hipparcos ezred ívmásodperces mérési pontossága még nem tette lehetővé a kísérőcsillagok asztrometriai kimutatását, a kettős cefeidákra kapott feltűnően sok – fizikailag értelmezhetetlen – negatív parallaxisérték jelezte, hogy a trigonometrikus parallaxisok kiszámítását kedvezőtlenül befolyásolta a kettős rendszerbeli pálya menti mozgás hatásának elhanyagolása.

A Gaia nagyságrendekkel pontosabb mérései e tekintetben sikert ígérnek, így kezdettől fogva részt veszünk e nagyszabású európai űrprogramban. Ehhez korábban az ESA PECS, majd PRODEX programja keretében anyagi támogatást is kaptunk. Eleinte csak a pulzáló változócsillagok adatainak feldolgozásával foglalkoztunk, majd a Gaia tényleges működésének beindulása után a *Gaia Science Alert* programhoz is csatlakoztunk. Ugyanis bizonyos objektumok Gaia által észlelt adatait soron kívül, azonnal nyilvánosságra hozzák, hogy megkönnyítsék a tágabb csillagászati közösség számára a késedelem nélküli nyomon követés megkezdését. Az újonnan felfedezett kisbolygókon kívül rendszeresen adnak ki tudományos riasztást a tudományos közösség számára az észlelt tranzien্স eseményekről, például szupernóvák kitöréséről és más hirtelen felfényesedő vagy elhalványodó objektumokról. A fiatal csillagoknak a Gaia tudományos riasztása alapján történt hazai vizsgálatának eredményeit Nagy Zsófia és munkatársai (2022) tanulmánya [9] részletesen is bemutatja.

Jelenleg nagyjából 10 magyar közreműködője van a 400-nál is több szakembert foglalkoztató Gaia DPAC-nak. Az itthoniak a fényességváltozással foglalkozó koordinációs egység (*Coordination Unit 7*, CU7) keretében tevékenykednek.

Zárszó helyett

Kedvező hír, hogy már foglalkoznak a Gaia utódjának tervezésével is. Az az űrszonda a közeli infravörös hullámhossztartományban térképezi fel majd az eget, erre utal a neve is: *GaiaNIR* (ahol a NIR a közeli infravörös angol megfelelőjének rövidítése). Az optikainál hosszabb hullámhosszakon ugyanis azok a csillagok is észlelhetők, amelyek fényét a látóirányba eső csillagközi anyag elnyeli. Így a Tejútrendszer fősíkjához és centrumához egészen közeli csillagokról is elkészíthető az egyelőre még hiányzó térkép. Erre azonban még legalább két évtizedet kell várni.

A Gaia monumentalitását igazolják a 2024 tavaszára vonatkozó alábbi tények:

- már 3500 napja folynak a tudományos mérések;
- az égbolt folyamatos monitorozása során eddig 250 milliárd átvonulást észleltek;
- ez idáig 130 terabájtnyi mérési adat gyűlt össze a Gaia műszereivel.

A szonda indításának 2013. decemberi tizedik évfordulójára készített összefoglaló képen (7. ábra) további érdekes és tanulságos számadatok láthatók.

Lesz még miről írni a Gaia eredményessége kapcsán.



7. ábra: Képes összefoglaló a Gaia első évtizedének statisztikai adatairól. (Forrás: ESA, CC BY-SA 3.0 IGO)

Irodalomjegyzék

- [1] Szabados L. (2020): A csillagászat Gaia kora. *Magyar Tudomány*, 2020/7, 909
- [2] Szabados L. (2020): Asztrometria 21. századi módon. *Meteor csillagászati évkönyv 2021*, Magyar Csillagászati Egyesület, Budapest, 216
- [3] Marschalkó G., Szabados L. (2014): Asztrometria – egy ősi tudomány újjászületése. *Európával a világűrben*, *Természet Világa* 2014/II. különszám, 31
- [4] Gaia Collaboration, Babusiaux C., van Leeuwen F., Barstow M.A. et al. (2018): Gaia Data Release 2. *Observational Hertzsprung–Russell diagrams*. *Astronomy & Astrophysics*, 616, A10
- [5] Cantat-Gaudin T. (2022): Milky Way Star Clusters and Gaia. *A Review of the Ongoing Revolution*. *Universe*, 8, 111
- [6] Bódi A., Kiss L.L. (2019): Physical Properties of Galactic RV Tauri Stars from Gaia DR2 Data. *Astrophysical Journal*, 872, 60
- [7] Szilágyi M., Kun M., Ábrahám P. (2021): The Gaia view of the Cepheus Flare. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 505, 5164
- [8] Helmi A., Babusiaux C., Koppelman H.H. et al. (2018): The merger that led to the formation of the Milky Way's inner stellar halo and thick disk. *Nature*, 563, 85
- [9] Nagy Zs., Ábrahám P., Kóspál Á., Szabados L., et al. (2022): Fiatal csillagok vizsgálata a Gaia űrtávcső adatai alapján. *Űrtan Évkönyv 2021*, Magyar Asztronautikai Társaság, Budapest, 63

A Magyar Asztronautikai Társaság 2023. évi tevékenységéről

Magyar Űrkutatási Fórum 2023

2023. május 3–5. között Sopronban zajlott egyesületünk immár több mint 50 éves (!) múltja visszatérő szakmai konferenciája, a **Magyar Űrkutatási Fórum**, az Eötvös Loránd Kutatási Hálózat (ELKH) Földfizikai és Űrtudományi Kutatóintézet (FI) kitűnő szervezésében. Ez a hazai űrkutató szakma két-évente esedékes legjelentősebb tudományos konferenciája. Az idei esemény különlegessége volt a záró szekció, amelyben a HUNOR űrhajós-kiválasztás és -kiképzés részleteiről, orvosi-pszichológiai vonatkozásairól hangzottak el előadások.

A korábbi nevén Ionoszféra- és Magnetoszféra-fizikai Szeminárium sorozata még 1972-ben kezdődött, a MANT jogelődje, a MTESZ Központi Asztronautikai Szakosztálya szervezésében. Kezdetekben évente gyűltek össze a szakma képviselői és a szemináriumokra az ország különböző pontjain került sor. Ahogy immár több mint 50 évvel ezelőtt, és azóta is több alkalommal, úgy idén is Sopron látta vendégül a találkozót. Az FI munkatársai Barta Veronika vezetésével szokás szerint kitűnő szervezőmunkát



végeztek annak érdekében, hogy emlékezetes konferenciáról térhessenek haza a résztvevők. A tudományos programban a hazai kutatók által művelt változatos szakterületek kaptak bemutatkozási lehetőséget. A 30 szóbeli előadás és 16 poszter témái között természetesen nagy hangsúllyal szerepeltek a földi ionoszféra, magnetoszféra, sugárzási övek kutatásának kérdései, de voltak például a naptevékenységgel, a Naprendszer kutatásával, az űrcsillagászzal kapcsolatos előadások is. A teljes program a Magyar Űrkutató Fórum 2023 előadásainak kivonatait tartalmazó kiadványban olvasható. A kötethez írt köszöntőjében *Almár Iván*, a MANT örökös tiszteletbeli elnöke, az 1972-es első szeminárium egyik résztvevője méltatta a sorozat fontosságát.

A konferenciát mintegy keretbe foglalta a HUNOR magyar űrhajósprogram, amelynek révén 2024 végén vagy 2025 elején magyar kutatóűrhajós dolgozhat a Nemzetközi Űrállomáson (ISS), egy 30 naposra tervezett repülésen. A jelentkezők közül gondos kiválasztási folyamat végén megmaradt négy űrhajósjelöltet nemrég ismerhette meg a közvélemény. A konferencia programja szerdán egy kerekasztal-beszélgetéssel kezdődött, amelyen elsősorban a HUNOR tudományos programján, a magyar kezdeményezésű kísérletek előkészítésén volt a hangsúly. *Ferencz Orsolya* miniszteri biztos elmondta, hogy az amerikai Axiom Space vállalattal együttműködésben végrehajtott program előkészületei rendben zajlanak, a partnerek elismerik a magyar szakemberek felkészültségét. A négy kiválasztott jelölt közül az egyik űrhajós a tervek szerint az Ax-5 jelű küldetés keretében utazik majd az ISS-re. A repülés előkészítése az Európai Űrügynökséggel (ESA) szoros együttműködésben folyik, a sikeres jelöltek az ESA orvosi minősítését is megszerezték.

A pénteki utolsó szekció előadói általában az űrrepülés orvosi vonatkozásairól, különösen pedig a HUNOR űrhajós-kiválasztás tapasztalatairól, érdekességeiről beszéltek. A *Merkely Béla*, a Semmelweis Egyetem rektora vezetésével zajló szekció és az előadásokat követő vitafórum különlegessége az volt, hogy a szélesebb hazai űrkutató közösség most először kapott ilyen részletes, tudományos igényű áttekintést arról az összetett munkáról, amely a következő magyar űrhajós kiválasztása, illetve a jelöltek felkészítése kapcsán folyik.

(Forrás: *Űrvilág*, fénykép: ELKH FI)

Műhold egy üdítősdobozban

Sokféle műhold létezik. Űrügynökségek, magáncégek, egyetemek, kutatócsoportok eszközei keringenek fejünk felett nap mint nap. Egy átlagos középiskolás számára mind az űr, mind ezek az intézmények távolinak tűnhetnek. Ám az Európai Űrügynökség (ESA) CanSat versenye éppen a műholdépítés alapjaival való megismerkedést teszi lehetővé.

Az első magyar országos CanSat verseny döntőjét 2023. április 12–13-án tartottuk – az indítási napot a Magyar Honvédség újdörögdi kiképzőbázisán, majd a prezentációs napot a tapolcai Tamási Áron Művelődési Központban. Tíz csapat eszköze jutott fel kutatórakétán 1 km magasságba, hogy aztán leereszkedve méréseket végezzen. A mérések feldolgozott adatait a második napon mutatták be a csapatok a szakmai zsűrinek.



A döntő fődíját elnyert csapat, a pécsi Janus Pannonius Gimnáziumból érkezett *MoSat* utazhatott az ESA európai döntőjére júniusban. A fődíjon kívül három különdíjat is kiosztott a szakmai zsűri: a debreceni Tóth Árpád Gimnázium *SBFSat* csapata nyerte a technikai különdíjat, a budapesti Madách Imre Gimnázium csapata, a *MIGSat* a tudományos különdíjat és a budapesti Karinthy Frigyes Gimnázium *Space Pelicans* elnevezésű csapata az ismeretterjesztésért járó különdíjat.

Mi a CanSat? A verseny keretein belül középiskolás diákok lehetőséget kaptak egy projektmunka formájában a saját, üdítősdoboz méretű kisműholdjuk megépítésére. Bár az űrbe nem küldik ki, a rakéta 1 km magasságba repíti a csapatok CanSatjeit, ahonnan azok maguktól ereszkednek le a földre, miközben küldetéseiket teljesítik. Igen, küldetéseket. Az elsődleges küldetés keretein belül légnyomást és hőmérsékletet kell rádióan továbbítani egy földi állomásnak. A másodlagos küldetésben viszont a csapatok teljesen szabad kezet kapnak. Ha van egy kreatív ötlet – legyen az tudományos vagy mérnöki eredetű –, CanSat küldetést lehet belőle csinálni, ha belefér egy 0,33 literes üdítősdobozba.

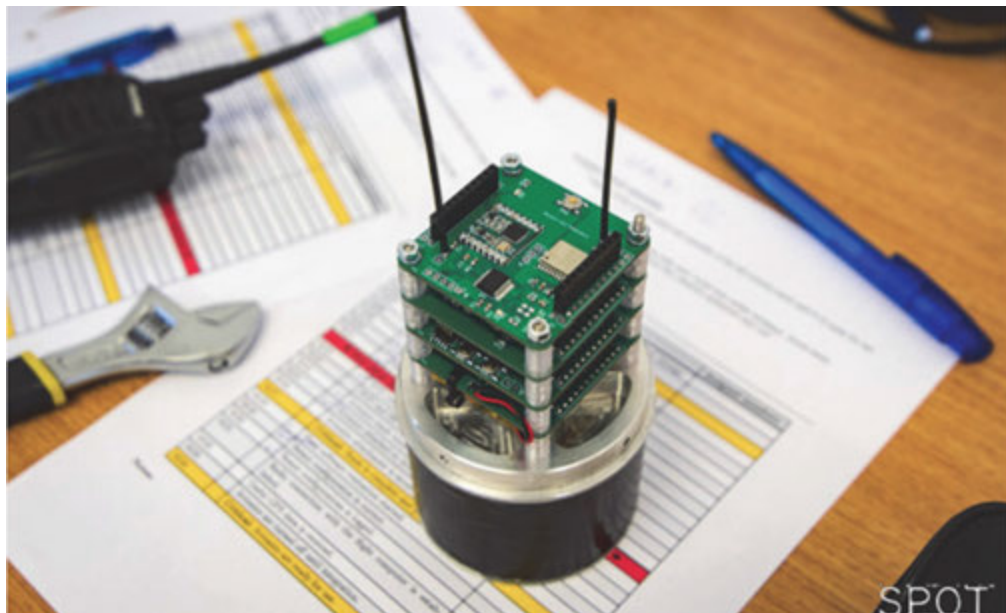
A 2023-as verseny magyar fordulóját a MANT szervezte az Asztronautikai Diákklub (ADK), a BME Sub-orbitals rakétaépítő versenycsapat és a BME Kozmosz Szakkollégium közreműködésével, a Nemzeti Média- és Hírközlési Hatósággal (NMHH) mint fő szakmai partnerrel, valamint szponzorok segítségével. A verseny során a diákok megtanulhatták, milyen lépései vannak egy műholdprojektnek az ötleteléstől a tesztelésig. Ezen felül a csapatmunka keretében az időbeosztást és a munkamegosztást is elsajátíthatták, hiszen különböző feladatköröket kellett ellátni a csapatban, mint például programozás, 3D modellezés, vagy az elektronika megtervezése, küldetések kidolgozása. A sok tudás és tapasztalat

hasznos mind az egyetemen, mind egy majdani munkahelyen, ezért egy jövőbeni önéletrajzban is jól mutat egy ilyen verseny.

Az eltelt hónapok alatt a diákok és tanáraik is sok szakmai támogatást kaptak: a szervezők írott anyagokat, oktatóvideókat készítettek és a versenyzők személyes, illetve online képzési alkalmakon ismerkedhettek meg a rádiókommunikáció, a hardver- vagy szoftvertervezés, a 3D tervezés és -nyomtatás alapjaival, de a csapatmunkához szükséges készségek fejlesztése sem maradt ki az átadott ismeretek közül.

A verseny során több dokumentumot kellett elkészíteni, mire kiderült, melyik 10 csapat eszköze repülhet rakétán a döntőben. Ezek olyan anyagok voltak (természetesen egyszerűbb, rövidebb változatban), amelyeket egy valódi űripari projekt során is el kell készíteni. Az első dokumentum az előzetes tervfelülvizsgálat (*Preliminary Design Review*, PDR) volt, amelyet mind a 42, a versenyre benevezett csapat benyújtott. Közülük 28 csapat küldte be a második mérföldkőre a kritikus tervfelülvizsgálat (*Critical Design Review*, CDR) című dokumentumot és hozzá egy ötperces videót. Ebben bemutatták a részletes terveket, amelyek alapján véglegesítették az eszközt. A CDR és a videó alapján kétlépcsős bírálattal választotta ki a zsűri a tíz döntőbe kerülő és három tartalék csapatot.

Két találkozón is részt vehettek a versenyzők a verseny hat hónapja során. Már januárban, a „Nagy Találkozó” megismerkedhettek a többi csapattal, megvitathatták a tervezés és kivitelezés során felmerült nehézségeket és az azokra megtalált megoldásokat és elkezdhettek egy aktív szakmai közösséget formálni. Találkozhattak a zsűri tagjaival is, akik így alaposabban megismerhették a csapatok elképzeléseit és tanácsaikkal segítették őket. A márciusi „Második Találkozót” *Ferencz Orsolya* úrkutatásért felelős miniszteri biztos nyitotta meg, valamint eljött két „meglepetésvendég” is: *Detre Őrs Hunor*, a James Webb-űrteleszkóp egyik létrehozója, aki felvillanyozó motivációs beszédet tartott,



majd *Horváth Attila* alezredes ismertette a Magyar Honvédség által biztosított helyszínt és az indítási nappal kapcsolatos tudnivalókat. Az Európai Űrügynökség CanSat versenyért felelős munkatársa, *Elsa Sánchez* a magyar versenyzőknek készített exkluzív videóüzenetben biztatta a csapatokat. A döntős és tartalék csapatok egy-egy egyedileg tervezett 3D-nyomtatott tokent kaptak „belépőjegyként” a döntőre, a döntőbe nem jutott csapatok tagjai pedig átvehettek egy-egy példányt a Magyarország és a világűr c. könyvből, amely a magyar űrtevékenység hiánypótló összefoglalójaként jelent meg 2021-ben.

A versenynek csak az egyik célja volt, hogy kiválasszuk az európai döntőre utazó magyar csapatot, de még fontosabb cél az, hogy minél több diák minél többet tanulhasson elektronikáról, programozásról, csapatmunkáról és magáról az űrtevékenységről. Öröm volt ennyi érdeklődő, aktív fiatallal és elhivatott pedagógussal találkozni!

(Fényképek: BME SPOT fotókör)

Diák pályázat és rajz pályázat

Április 14-én az Abacus Stúdióban tartottuk a MANT diák pályázatának és rajz pályázatának ünnepélyes eredményhirdetését és díjátadóját, amelyet *Both Előd* csillagász, egyesületünk korábbi elnöke vezetett. Az idei téma a jelenleg is futó űrhajós-kiválasztáshoz kapcsolódott: *Tervezd meg a következő magyar űrhajós programját!* Jobbnál jobb pályamunkák érkeztek, közülük választotta ki a MANT szakértőiből álló zsűri a legjobbakat. A hideg, esős idő ellenére sokan eljöttek a diákok és felkészítő tanáraik közül is.

Elsőként szokás szerint egy előadást hallgathattak meg, ezúttal *Medvegy Anna* biológustól, a MANT főtítkárhelyettesétől. A pályázat témájához kapcsolódva arról beszélt, hogy az űrhajósok közérzetére, egészségére milyen hatást gyakorol a kis térben, bezártságban, súlytalanságban eltöltött rövidebb-hosszabb idő. Az előadás után minden díjazott röviden bemutatta a pályamunkáját, mielőtt átvette az oklevelét és a könyvjutalmat. Köszönjük a *Galaktika* kiadó támogatását, amellyel értékes sci-fi kiadványokkal járultak hozzá a díjakhoz!

A 2023. évi MANT diák pályázat díjazottainak névsora:

11-14 éves egyéni

Küldődj: *Palicz Timót* (Balassi Bálint Nyolcévfolyamos Gimnázium, Budapest, felkészítő: *Komáromi Annamária*)

11-14 éves csapat

Küldődj: *Miklósi-Czenner Soma, Guba Noel, Szatur Noémi* (Miskolci Arany János Általános Iskola és AMI, felkészítő: *Juhász Béla*)

15-18 éves egyéni

1. díj: *Kis Botond* (Bolyai Tehetséggondozó Gimnázium és Kollégium, Zenta, Szerbia)

2. díj: *Szegedi Bence Bálint* (Piarista Gimnázium és Kollégium, Vác, felkészítő: *Szabó-Pál Eszter, Dr. Hortoványi Judit, Fockter Zoltán*)

3. díj: Nagy Alpár (Székely Mikó Kollégium, Sepsiszentgyörgy, Románia, felkészítő: Pető Mária)

15–18 éves csapat

1. díj: Kőszegi Natasa, Bordás Kincső (Alternatív Közgazdasági Gimnázium, Budapest, felkészítő: Reiter Dániel)

2. díj: Forró Jakab, Gáll Bence (Alternatív Közgazdasági Gimnázium, Budapest, felkészítő: Reiter Dániel)

A 2023. évi MANT rajzpályázat díjazottainak névsora:

11–14 éves csapat

1. díj: Szepecsik Réka, Nagy-Gáspár Petra, Nagy Dóra (Szokolay Sándor Alapfokú Művészeti Iskola, Békés, felkészítő: Dávidné Gyarmati Zsuzsanna)

2. díj: Botos Gréta Amarilla, Sebestyén Nóra (Dr. Hepp Ferenc Általános Iskola, Békés, Dávidné Gyarmati Zsuzsanna)

3. díj: Hegyi Csongor, Dibuz Hanna Boglárka, Takács Péter, Bencze János (Pécsi Belvárosi Általános Iskola, felkészítő: Varga Ágnes)

11–14 éves egyéni

1. díj: Kubovics Izolda (Szokolay Sándor Alapfokú Művészeti Iskola, Békés, felkészítő: Dávidné Gyarmati Zsuzsanna)

2. díj: Kovács Áron (Miskolci Arany János Általános Iskola és AMI, felkészítő: Juhász Béla)

3. díj: Baráth-Hajmássy Viktória (Szokolay Sándor Alapfokú Művészeti Iskola, Békés, felkészítő: Dávidné Gyarmati Zsuzsanna)

Jubileumi 30. nyári Űrtábor Dabason

A MANT, hazánk legrégebbi űrkutatással foglalkozó egyesülete 1994 óta szervezi meg az érdeklődő fiatalok számára nyári Űrtáborát, változó helyszíneken. Így az idei volt a harmincadik alkalom. A nagy sikerrel zajló, egyedülálló programkínálatot nyújtó táborokon résztvevő diákok közül sokan műszaki, illetve természettudományos pályán tanultak tovább, néhányukból pedig azóta már űrkutató szakember lett.

Az életre szóló élmények és barátságok kialakulása mellett a diákok a hét során elismert hazai űrszakemberektől hallgathatnak exkluzív előadásokat. A 13–18 éves fiataloknak szóló Űrtábor helyszíne ebben az évben július 2–8. között Dabas volt, az Érdi Szakképzési Centrum Kossuth Zsuzsanna Szakképző Iskola és Kollégium vendéglátásában. A hét programjában szinte minden olyan téma szerepelt, amely érdekelheti a világűr kutatásának szerelmeseit. Az űrkutatás, csillagászat, űrtechnológia és űrtávközlés alapjainak megismerésén túl volt rendhagyó kémiaóra, szó esett az űrsebészetről, űrbalesetekről és űrkatasztrófákról. A diákok első kézből tudhatták meg, hogyan válhatnak űrmérnökké, vagy akár űrhajóssá. A táborot ugyanis meglátogatták a HUNOR űrhajós programban kiválasztott űrhajósjelöltek. Négyük közül kerül majd ki az, aki a következő magyar kutató űrhajósként 2024-ben vagy 2025-ben eljuthat a Nemzetközi Űrállomásra.



A további előadásokban szóba kerültek kisebb és nagyobb műholdak, Elon Musk rakétái és űrhajói, a Holdra való emberes visszatérés. Az óriásbolygókkal több előadó is foglalkozott, bemutatva egyrészt a magyar részvételt az idén indított európai JUICE Jupiter-szonda programjában, másrészt azt, hogyan lehet a bolygók légköri folyamatait a laboratóriumban modellezni. De a résztvevők izelítőt kaptak az űrgazdaságból és találkozhattak, beszélgethettek a hazai űripar képviselőivel is. Természetesen nem maradhatott el a vízirakétázás sem. Mindeközben a táborlakók maguk is dolgoznak a heti csapatmunkájukon, amelynek eredményéről a tábor vége felé számoltak be egymásnak.

A tábor szakmai partnerei az Andersen Adótanácsadó Zrt., a Külgazdasági és Külügyminisztérium, a Nemzeti Média- és Hírközlési Hatóság és az Űrvilág űrkutatási hírportál voltak.

Egy-egy gondolatot idézünk a 2023-as Űrtáborban részt vevő diákok beszámolóiból: „Olyan dolgokat tudhattam meg, amilyeneket a suliban nem tanítanak (...) Ha jövőre is el tudok jönni, mindenféleképpen ott leszek.” (Csiszár Kincső) „Szerintem az a legjobb az Űrtáborban, hogy hozzám hasonló érdeklődésű fiatalokkal lehetek, és sok, a témában már tapasztalt előadó előadásait együtt hallgathatjuk végig.” (Kis Botond)

Irány az űr! verseny

A MANT 2023-ban harmadik alkalommal hirdette meg *Irány az űr!* elnevezéssel Kárpát-medencei űrkutatási csapatversenyét magyarországi és a határon túli középiskolásoknak. A versenyre négyfős



csapatok nevezhettek, egy csapatot három tanuló és egy mentor alkotott. Az érdeklődés nagy volt, a jelentkező csapatok száma idén is elérte a százat.

A verseny személyes részvétellel tartott döntőjének öt csapatból álló mezőnye két online feladatmegoldási forduló után alakult ki. A döntőre december 2-án Budapesten, a városligeti Magyar Zene Háza könyvtárában került sor. A döntőbe jutott csapatok és iskoláik az alábbiak voltak:

- *Csirkeinvázió* (Csokonai Vitéz Mihály Gimnázium, Debrecen)
- *Alma2023* (Kazinczy Ferenc Gimnázium és Kollégium, Győr)
- *Apollókötők* (Debreceni Református Kollégium Dóczy Gimnáziuma, Debrecen)
- *Sherlock Ohms* (Illyés Gyula Gimnázium, Budaörs)
- *fogyatéknymoték* (Bányai Júlia Gimnázium, Kecskemét)

A csapatok tiszta lappal indultak, az előző fordulókban gyűjtött pontszámaikat nem hozták magukkal. A versenyzőket az egyik fő támogató, a Külgazdasági és Külügyminisztérium nevében *Ferencz Orsolya* úrkutatásért felelős miniszteri biztos, valamint a másik fő szakmai partner, a Nemzeti Média- és Hírközlési Hatóság képviseletében *Vári Péter* főigazgató-helyettes köszöntötte. *Kovács Kálmán*, a MANT és egyben a zsűri elnöke megnyitotta a versenyt, amelyet *Both Előd* vezetett.

A jó hangulatban, feszített ütemben zajló vetélkedés során a csapatok változatos kihívásokkal, zenei kérdésekkel, tippversennyel, képfelismeréssel, képes totóval is szembesültek – mindennek természetesen köze volt az űrtevékenységhez! Bemutatták továbbá az előzetesen elkészített saját előadásait egy-egy marsi űrszondás programmal kapcsolatban. Teljesítményüket ötfős szakmai zsűri (*Kovács Kálmán* elnök, *Boross Katalin*, *Frey Sándor*, *Horvai Ferenc* és *Páli Jenő*) értékelte folyamatosan.

A 2023-as *Írány az űr!* verseny nyertese igen szoros küzdelemben az *Apollókötők* csapat lett (diák tagjai *Szabó Péter*, *Vágó Botond* és *Fazakas Bálint*, mentoruk *Tófalusi Péter*). Ők egy utazáson vehettek

részt az Európai Űrügynökség (ESA) hollandiai technológiai központjába (ESTEC, Noordwijk). A második *Sherlock Ohms* és harmadik helyezett *Alma 2023* csapatok diák tagjai ajándékutalványokat kaptak, ahogy a döntőbe jutott csapatok felkészítő tanárai is. Minden résztvevő kapott könyvjutalmat.

A döntő zárásaként különleges meglepetésben volt részük a versenyző csapatoknak. A diákokat ugyanis meglátogatta a HUNOR magyar űrhajós program négy kiválasztott űrhajósjelöltje. Az eredményhirdetést követő kötetlen beszélgetés során *Szakály András*, *Schlégl Ádám*, *Cserényi Gyula* és *Kapu Tibor* mesélt a most folyó felkészítésük során szerzett élményeikről és válaszolt a diákok kérdéseire.

Az Irány az űr! verseny fő támogatói a Külgazdasági és Külügyminisztérium és a Nemzeti Média- és Hírközlési Hatóság, további támogatói a REM Kutató, Fejlesztő, Innovációs és Oktató Zrt., valamint a Kárpát-medencei Tehetségkutató Alapítvány voltak. A verseny fordulójának és döntőjének szervezésében, lebonyolításában Both Előd irányításával a MANT számos önkéntese vett részt.

(Fénykép: Trupka Zoltán)

Rendezvényeink a szakmai közönségnek és más érdeklődőknek

A MANT szerteágazó tevékenységének egyik legfontosabb eleme a kezdetektől fogva a szakmai-ismeretterjesztő előadások, rendezvények szervezése volt. Ezek az alkalmat adnak a hazai űrszektorban zajló kutatások, fejlesztések megismerésére, a személyes kapcsolatteremtésre, valamint a világ űrtevékenységére való kitekintésre is.

Még 2022 végén indítottuk *MANT workshopjaink* új sorozatát, amellyel a tudománykommunikáción túl a szakmai közönség felé is nyitni szeretnénk. Célunk, hogy a hazai űrkutatás, űrtevékenység aktív résztvevői számára érdekes és fontos technikai képzéseket és rendezvényeket tartsunk, aktuális pályázati, tervezési, engedélyeztetési kérdéseket megvizsgálva. Az átadott tudásanyag a legtöbb esetben akár gazdasági értéket is képviselhet. A két 2022-es workshopot 2023-ban nem kevesebb mint nyolc rendezvény követte, amelyek számos érdeklődőt és támogatót – magánszemélyeket és vállalkozásokat – vonzottak. Az alkalmak közt többször kerültek terítékre az Európai Űrügynökséggel (ESA) kapcsolatos témák, külön hangsúllyal a magyar űripari szereplők számára is elérhető pályázati lehetőségekre, mint például az újonnan kiírt *Requesting Party Activities* felhívásra. Bemutakoztak a magyar ESA-delegáció tagjai, de szó esett az infravörös tartományban végzett Naprendszer-kutatásról és az ESA PRODEX programja keretében folyó, az űrügynökség küldetéseiben való magyar részvételt segítő kutatási-fejlesztési programokról is. Februárban bemutatkoztak az MRC-100 műegyetemi nanoműhold alkotói, májusban pedig *Don Koulaouzos*, a Skytrek ügyvezető igazgatója, a MANT tagja tartott személyes hangvételű, angol nyelvű előadást az űriparban, elsősorban a műholdas távközlési szektorban eltöltött több mint 35 évének tanulságairól. Decemberben egy alkalommal áttekintettük a Nemzetközi Űrállomáson (ISS) rendelkezésre álló kutatási infrastruktúrát abból az alkalomból, hogy a HUNOR űrhajós program keretében a magyar űripar és űrkutatók számára új lehetőség nyílt az ISS-en végrehajtandó kísérletek kezdeményezésére.



Űrkorszak sorozatcím alatt 2023-ban is folytatódott szakmai szemináriumaink sorozata, a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetemmel (BME) közös szervezésben. Júniusban *Hajjan Hu* (Haiyan Hu), a kínai űrkutatás egyik vezető személyisége tartott székfoglaló előadást a Magyar Tudományos Akadémián, utána pedig egy pódiumbeszélgetésen vett részt. Az év második felében vendégeink voltak még a BME-n *Horváth Gyula* (Új irányok a C3S Kft-nél), *Szalai Sándor* (Magyar műszer útban a Jupiter-hez), *Apáthy István* (Egy veterán űrkutató tarisznyájából – két alkalommal is), *Dudás Levente* (Egyetemről Föld körüli pályára) és *Bartóki-Gönczy Balázs* (Európa helye és lehetőségei a globális űrversenyben).

A MANT hagyományosan minden év októberében megrendezi az *Űrkutatás Napját*. Ahogy az azt megelőző évben, úgy 2023-ban is a rendezvény támogatója és egyben házigazdája a Nemzeti Média- és Hírközlési Hatóság (NMHH) volt. Az időpont október 12., a helyszín az NMHH nemrég átadott új, többfunkciós műszaki épülete (1133 Budapest, Esztergomi út 9.) volt. Az előadások kapcsolódtak az idei Nemzetközi Világűr hét központi témájához: a világűr és a vállalkozások.

A mindenki számára szabadon és díjmentesen látogatható Űrkutatás Napja és az Űrkorszak szemináriumok előadásai nem csak személyes helyszíni részvétellel, de általában élő internetes közvetítés segítségével is követhetők. Ebben partnerünk a *Galileo Webcast* csapata. A felvételeket utólag elérhetővé tesszük a MANT YouTube-csatornáján is. A közvetítések és a felvételek segítenek azoknak az érdeklődőknek, akik egy-egy alkalommal időben vagy térben nem tudják megoldani az élő, személyes jelenlétet az eseményeken.

Tartalom

Előszó.....	3
Kisvárdai Imre, Forgács-Dajka Emese, Gálík Barbara, Pádár Noémi, Bebesi Zsófia A kozmikus sugárzás és a napaktivitás kapcsolata	4
Gálík Barbara, Forgács-Dajka Emese, Pádár Noémi, Bebesi Zsófia Napkutató az űrszondák mérési tükrében.....	18
Kereszturi Ákos Műszertechnikai fejezetek a mérnöki bolygótudományból	43
Varga Nándor Időszakos vízborítás és vegetáció vizsgálata egy marsi analóg területen Marokkóban, Landsat műholdfelvételek segítségével	51
Könyves-Tóth Réka A James Webb-űrtávcső elképesztő szupernóva-felvételei	64
Szabados László A mikro és a giga szimbiózis - Tíz éve működik a Gaia asztrometriai űrszonda	73
A Magyar Asztronautikai Társaság 2023. évi tevékenységéről	86